Atomfizika előadás
4. Elektromágneses sugárzás

2014. október 1.

Alapkísérletek

- Ampere-féle gerjesztési törvény
  mágneses tér örvényessége – elektromos áram + elektromos tér változása
- Faraday indukciós törvénye
  elektromos tér örvényessége – mágneses tér változása
- Az elektrosztatika Gauss-tétele
  elektromos tér forrása – elektromos töltések
- Különálló mágneses töltés
  mágneses tér forrása – nincs külön mágneses töltés

Maxwell-egyenletek vákuumban

$$\frac{1}{\mu_0}\oint \underline{B}d\underline{s} = I + \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$$

$$\oint \underline{E}d\underline{s} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

$$\oiint \underline{E}d\underline{A} = \frac{\sum Q_i}{\varepsilon_0}$$

$$\oiint \underline{B}d\underline{A} = 0$$

→ Matematikai tételek →

$$rot\,\underline{B} = \underline{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \underline{\dot{E}}$$

$$rot\,\underline{E} = -\underline{\dot{B}}$$

$$div\,\underline{E} = \frac{\rho_E}{\varepsilon_0}$$

$$div\,\underline{B} = 0$$

Nincsenek források: töltés nincs $\rho=0$ áram nincs $j=0$ →

$$rot\ rot\,\underline{B} = \varepsilon_0\mu_0 rot\,\underline{\dot{E}} = \varepsilon_0\mu_0\left(rot\,\underline{E}\right)' = -\varepsilon_0\mu_0\underline{\ddot{B}}$$

$$rot\ rot\,\underline{E} = -rot\,\underline{\dot{B}} = -\left(rot\,\underline{B}\right)' = -\varepsilon_0\mu_0\underline{\ddot{E}}$$

$$rot\ rot\,\underline{X} = grad\ div\,\underline{X} - \Delta\underline{X}$$

$$div\,\underline{X} = 0 \text{ ha } X = E, B$$

→

$$\boxed{\begin{aligned}\Delta E - \varepsilon_0\mu_0\ddot{E} &= 0\\ \Delta B - \varepsilon_0\mu_0\ddot{B} &= 0\end{aligned}}$$

Hullámegyenlet

egyenlet

$$\underline{V}(\underline{r},t)$$

$$\frac{\partial^2 V_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_i}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_i}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 V_i}{\partial t^2}=0$$

$$i=x,y,z \qquad V=E,B$$

megoldás

$$V_i(\underline{r},t)=V_{i0}\sin(\underline{k}\,\underline{r}-\omega t+\varphi_i)$$

$$k_x^2V+k_y^2V+k_z^2V-\frac{1}{c^2}\omega^2V=0$$

$$\text{o.k. ha}: \ k^2=\left(\frac{\omega}{c}\right)^2$$

$$\Delta E_i-\varepsilon_0\mu_0\ddot{E}_i=0$$

$$\Delta B_i-\varepsilon_0\mu_0\ddot{B}_i=0$$

6 db hullámegyenlet,
az elektromos és a mágneses tér egyes komponenseire, és

$$\varepsilon_0\mu_0=\frac{1}{c^2}$$

Nem függetlenek egymástól, ki kell elégítsék a Maxwell-egyenleteket!

A megoldás függvény leírása: síkhullám

$$V(\underline{r},t)=V_0\sin(\underline{k}\underline{r}-\omega t+\varphi)\ \text{és}\ k=\frac{\omega}{c}$$

A tér minden pontjához rendelünk egy számot (*V*) minden időpillanatban.
A sin függvény argumentuma, vagy fázisa: $\alpha=\underline{kr}-\omega t+\varphi$

Azon pontok a térben egy adott időpillanatban, ahol α azonos,
ott van ahol $\underline{kr}$ azonos: ez egy sík, ami $\underline{k}$-ra merőleges

A t_0 időpillanatban az α_0-fázissal jellemzett sík, hol lesz *dt* idő múlva?

$$\alpha_0=\underline{k}\underline{r_1}-\omega t_0+\varphi\ \text{és}\ \alpha_1=\underline{k}(\underline{r_1}+\underline{dr})-\omega(t_0+dt)+\varphi\rightarrow\underline{k}\,\underline{dr}-\omega dt=0$$

$$\underline{k}\,\underline{dr}=\omega dt=\text{állandó}$$

Ezen pontok helye szintén $\underline{k}$-ra merőleges sík, dr_k távolsággal eltolva

k irányában nézve: dr/dt=ω/k, ezt hívjuk fázissebességnek,
az azonos V értékkel jellemzett sík sebességét jelenti,
éppen az alapegyenletben szereplő c-vel egyezik meg.
Az ilyen függvény neve síkhullám

Paraméterek jelentése

A $\sin(x)$ függvény ismert, és 2π szerint periódikus

$\sin(\omega t)$ időben változik, $\omega t= 2\pi$ szerint periódikus, azaz $T= 2\pi/\omega$ a periódusa

$\sin(\omega t+\varphi) = \sin(\omega(t+\varphi/\omega))$ csak egy időbeli eltolást jelent, $\Delta t=\varphi/\omega$

$\sin(\alpha)=\sin(\underline{kr}- \omega t+\varphi)$ már térben és időben is változik

t=állandó, akkor $\underline{k}$ irányában szinuszfüggvény szerint változik a *V értéke*.
r és $r+(2\pi/k)$ helyeken ugyanakkora a V, $2\pi/k=\lambda$ a periódusa
λ a hullámhossz, $\underline{k}$ a hullámszám, ennek van iránya!

r=állandó esetén időben szinuszos, azaz V értéke egy pontban harmonikusan változik, „oszcillál” $-V_0$ és V_0 között
a $t+2\pi/\omega$ időpillanatban értéke megegyezik a t-belivel, így a periódusideje $T=2\pi/\omega$, ω a körfrekvencia, $\omega/2\pi=1/T=\nu$ a frekvencia

Elektromágneses síkhullám komponensei

$$E_x = E_{x0}\sin(\underline{k}\,\underline{r} - \omega t + \varphi_{Ex}) \qquad B_x = B_{x0}\sin(\underline{k}\,\underline{r} - \omega t + \varphi_{Bx})$$

$$E_y = E_{y0}\sin(\underline{k}\,\underline{r} - \omega t + \varphi_{Ey}) \qquad B_y = B_{y0}\sin(\underline{k}\,\underline{r} - \omega t + \varphi_{By})$$

$$E_z = E_{z0}\sin(\underline{k}\,\underline{r} - \omega t + \varphi_{Ez}) \qquad B_z = B_{z0}\sin(\underline{k}\,\underline{r} - \omega t + \varphi_{Bz})$$

Milyen hullámok mehetnek azonos irányba?

Keressük az adott $\underline{k}$ vektorhoz tartozó hullámot. (Akkor ω is adott)

Ez $\underline{k}$ irányába halad. Legyen a $\underline{k}$ éppen z koordináta irányában.

Akkor $\underline{kr} = k_z z = kz$, *tehát* $\alpha_i = kz - \omega t + \varphi_i$

az egyes komponensek nem függenek x,y-tól

Helyettesítsük vissza a forráserősségek egyenleteibe egyenletbe:

$$div\,\underline{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 = \frac{\partial E_z}{\partial z} = E_{z0} k \cos(\alpha_{Ez}) \quad \rightarrow \quad E_{z0} = 0$$

$$div\,\underline{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 = \frac{\partial B_z}{\partial z} = B_{z0} k \cos(\alpha_{Bz}) \quad \rightarrow \quad B_{z0} = 0$$

Az $\underline{E}$, $\underline{B}$-nek csak x,y komponensei vannak, és nem függenek x,y-tól, ha $\underline{k}$ z irányú

Visszahelyettesítés az örvényegyenletekbe

$$rotE = -\dot{B} \;\rightarrow\; (rot\,\underline{E})_x = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = 0 - kE_{y0}\cos(\alpha_{Ey}) = -(-\omega)B_{x0}\cos(\alpha_{Bx})$$

$$\rightarrow \quad B_{x0} = -\frac{k}{\omega}E_{y0} = -\frac{1}{c}E_{y0} \quad \text{és} \quad \varphi_{Ey} = \varphi_{Bx} = \varphi_1$$

$$\rightarrow (rot\,\underline{E})_y = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = kE_{x0}\cos(\alpha_{Ex}) = -(-\omega)B_{y0}\cos(\alpha_{By})$$

$$\rightarrow \quad B_{y0} = \frac{k}{\omega}E_{x0} = \frac{1}{c}E_{x0} \quad \text{és} \quad \varphi_{Ex} = \varphi_{By} = \varphi_2$$

Ezeket behelyettesítve:

$$E_x = E_{x0}\sin(kz - \omega t + \varphi_2) \qquad B_x = -\frac{1}{c}E_{y0}\sin(kz - \omega t + \varphi_1)$$

$$E_y = E_{y0}\sin(kz - \omega t + \varphi_1) \qquad B_y = \frac{1}{c}E_{x0}\sin(kz - \omega t + \varphi_2)$$

$$E_z = 0 \qquad B_z = 0$$

Két módus tud z irányban haladni

1. $$E_x = E_{x0}\sin(kz - \omega t)$$

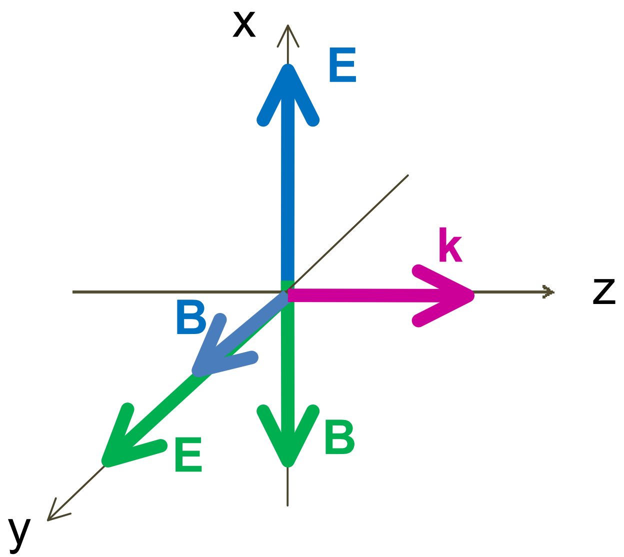
2. $$E_y = E_{y0}\sin(kz - \omega t + \varphi)$$

$$E_z = 0$$

$$B_x = \frac{1}{c}E_{y0}\sin(kz - \omega t + \varphi)$$

$$B_y = -\frac{1}{c}E_{x0}\sin(kz - \omega t)$$

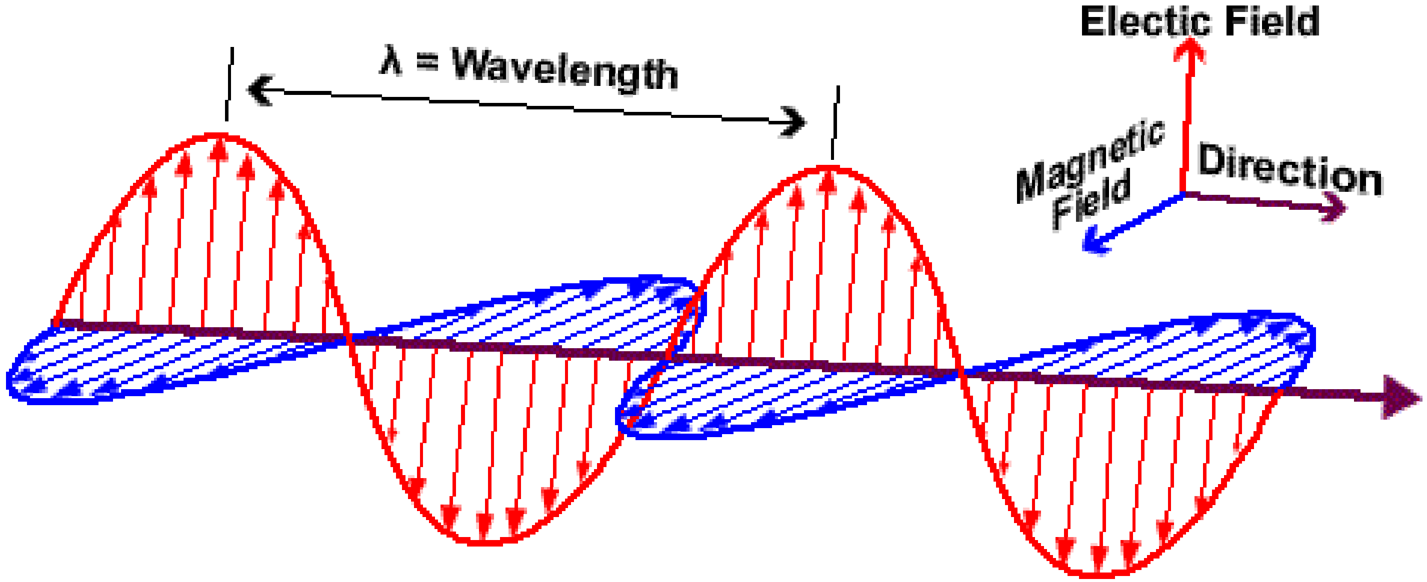
$$B_z = 0$$



E_{x0}, E_{y0} és φ határozzák meg az EM hullámot.

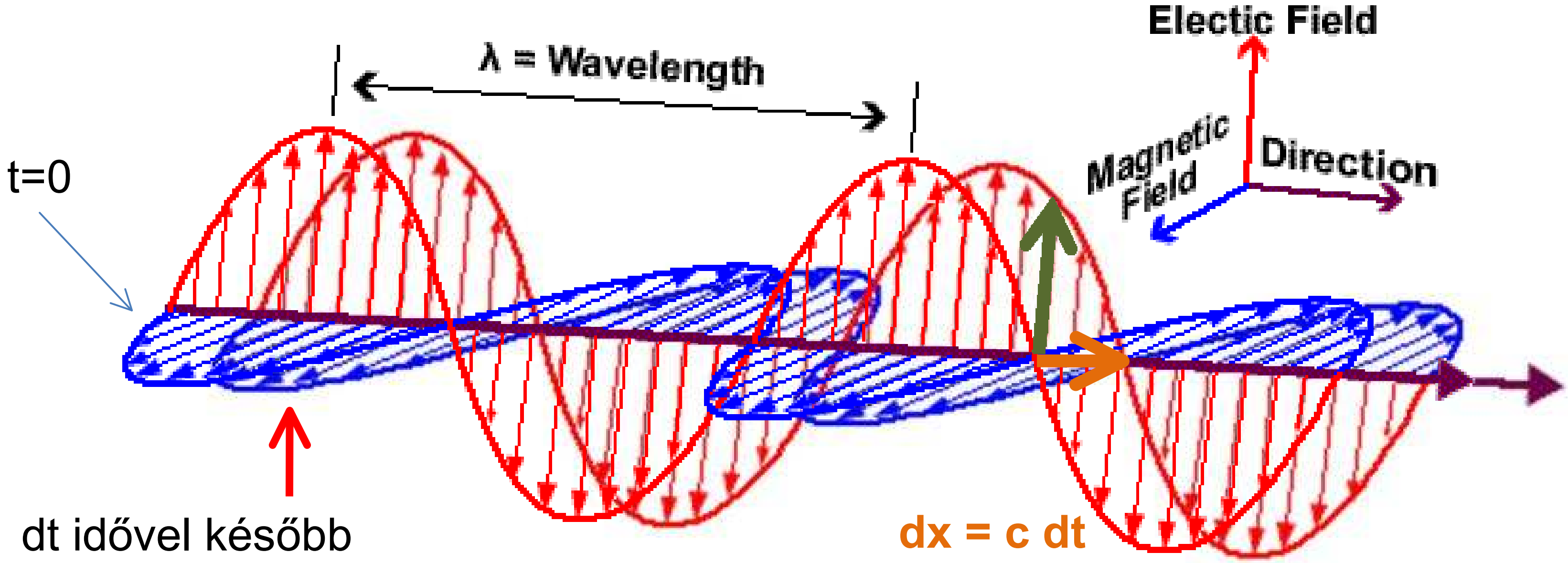
E, B, k jobbsodrású rendszer, mindkét módusban → merőlegesek:
transzverzális hullám
egy módusban E és B azonos fázisban változik

Lineárisan polarizált EM hullám



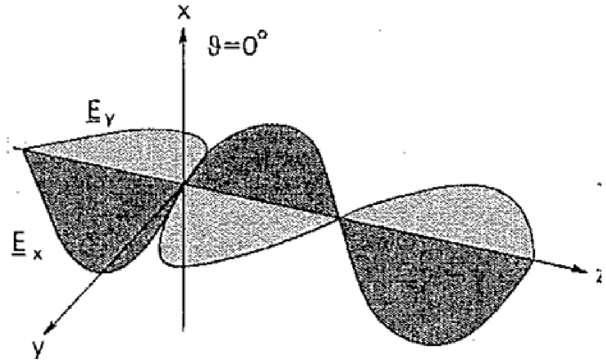
Egy módus van csak, a függőleges $\underline{E}$ terű, $E_{y0}=0$

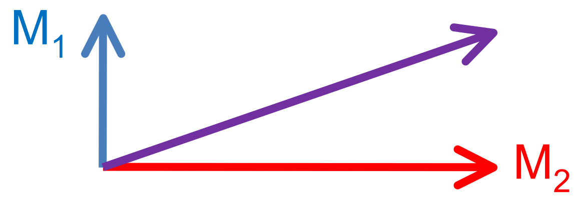
Lineárisan polarizált EM hullám



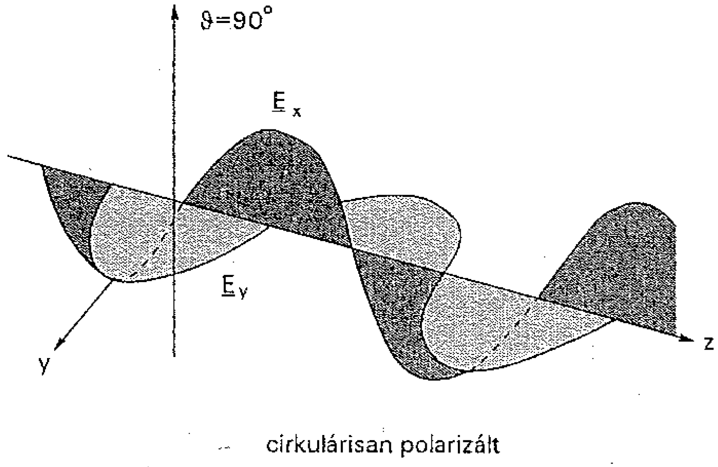
Speciális esetek

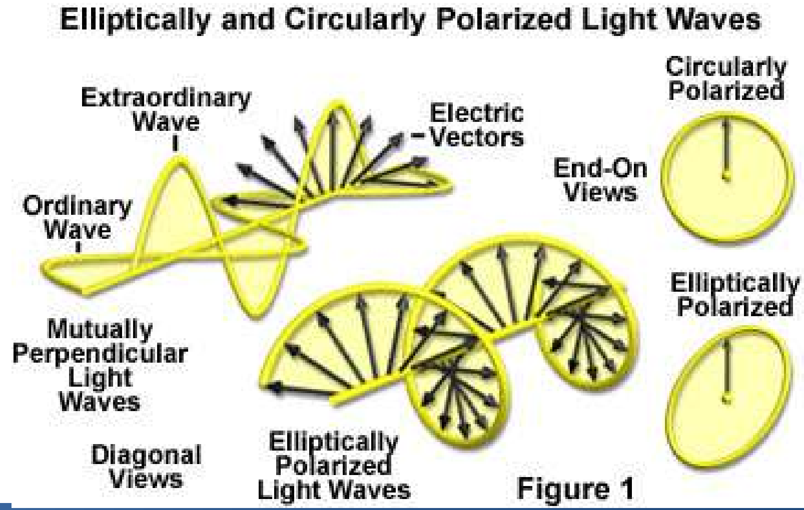
- φ=0° lineárisan polarizált marad, de másik síkban



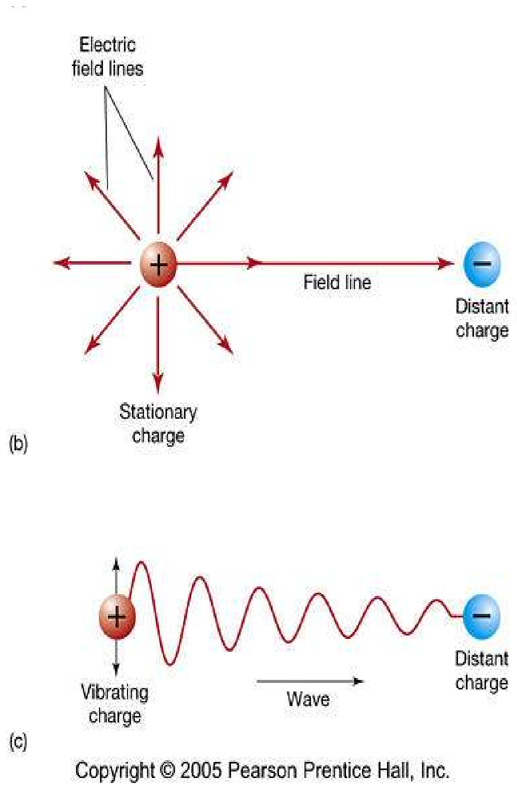


- $E_{y0}=E_{x0}$ és φ=90° cirkulárisan polarizált fény





EM sugárzás keltése



Gyorsuló töltés sugároz,
Elektromos térerősség és
mágneses indukció vektorok leszakadnak a
gyorsuló töltésről

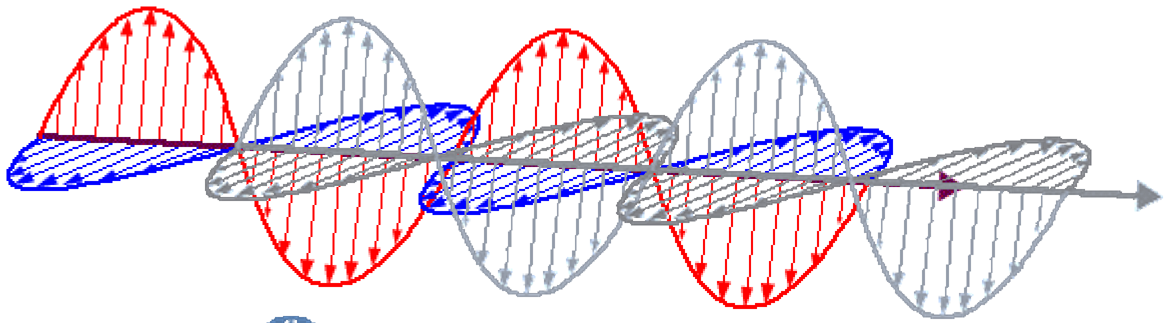
Pl. harmonikusan rezgő töltések,
antenna, tv- és rádióadók

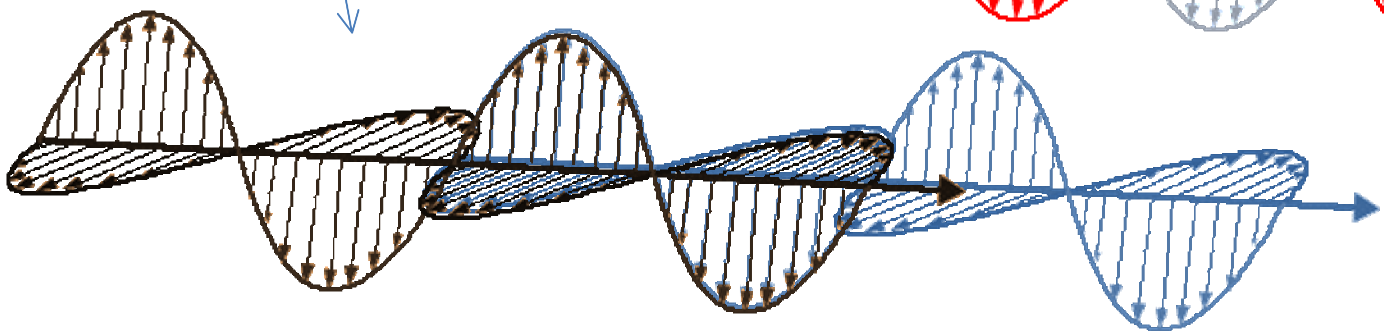
a hőmozgás miatt minden test sugároz!

Fényinterferencia

- Szétváló fényutak később találkoznak, de más hosszúságú utat tesznek meg közben
- $\Delta\alpha$=0 vagy 2π $\Delta\alpha=\pi$ kioltás, $\Delta\alpha=k\Delta r= 2\pi\ (\Delta r/\lambda)$

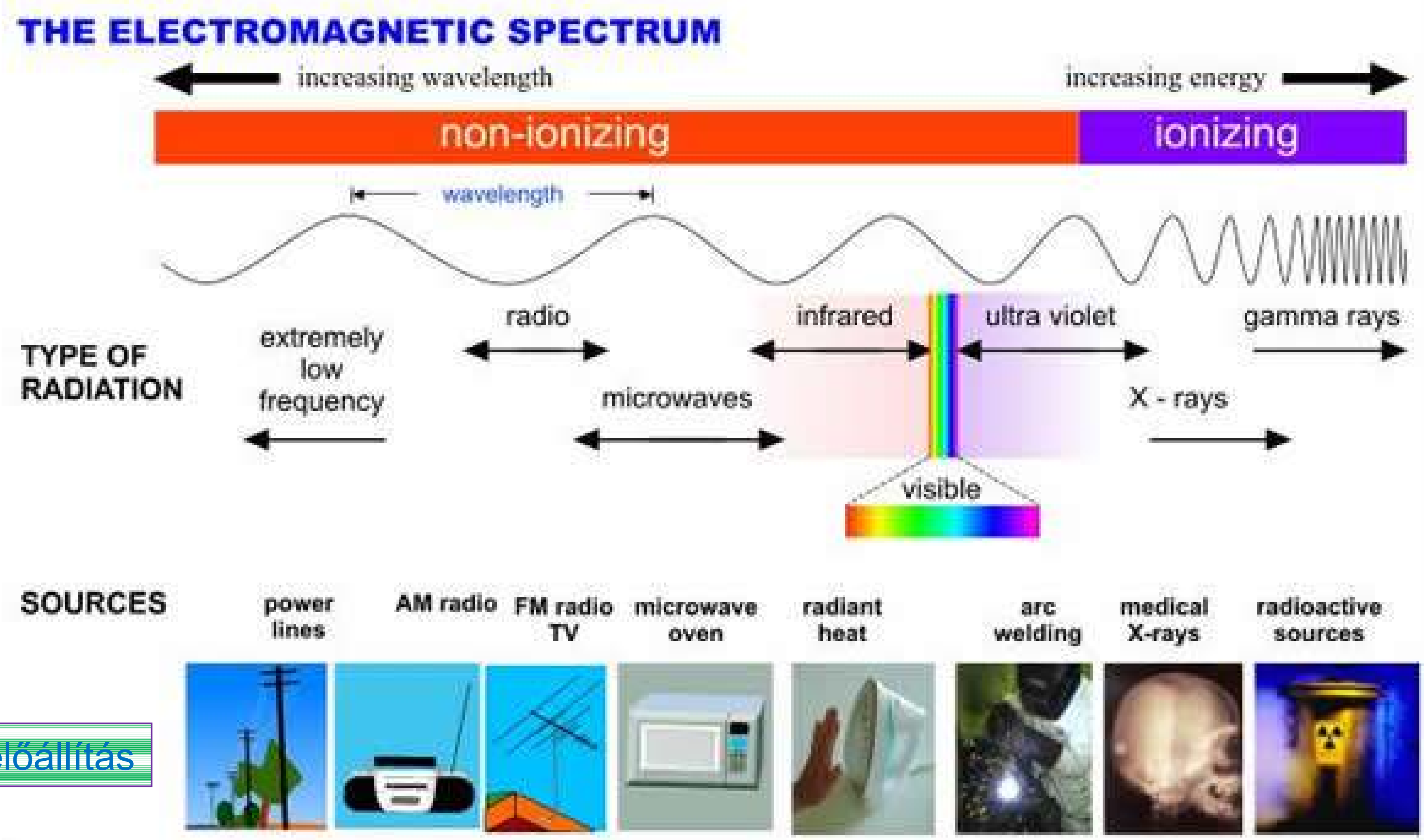
erősítés





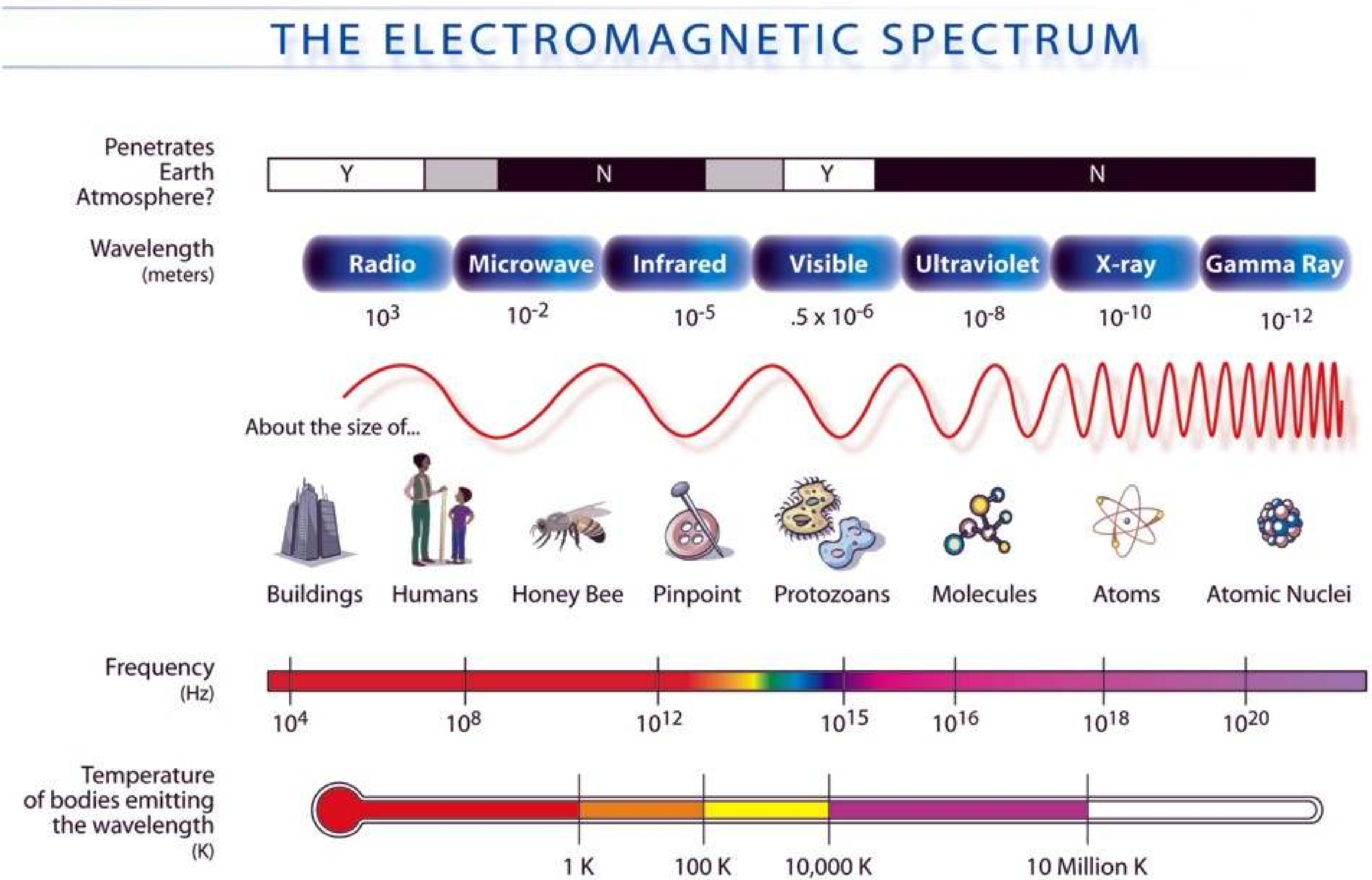
Alapvető hullámtulajdonság

Az elektromágneses spektrum 1.

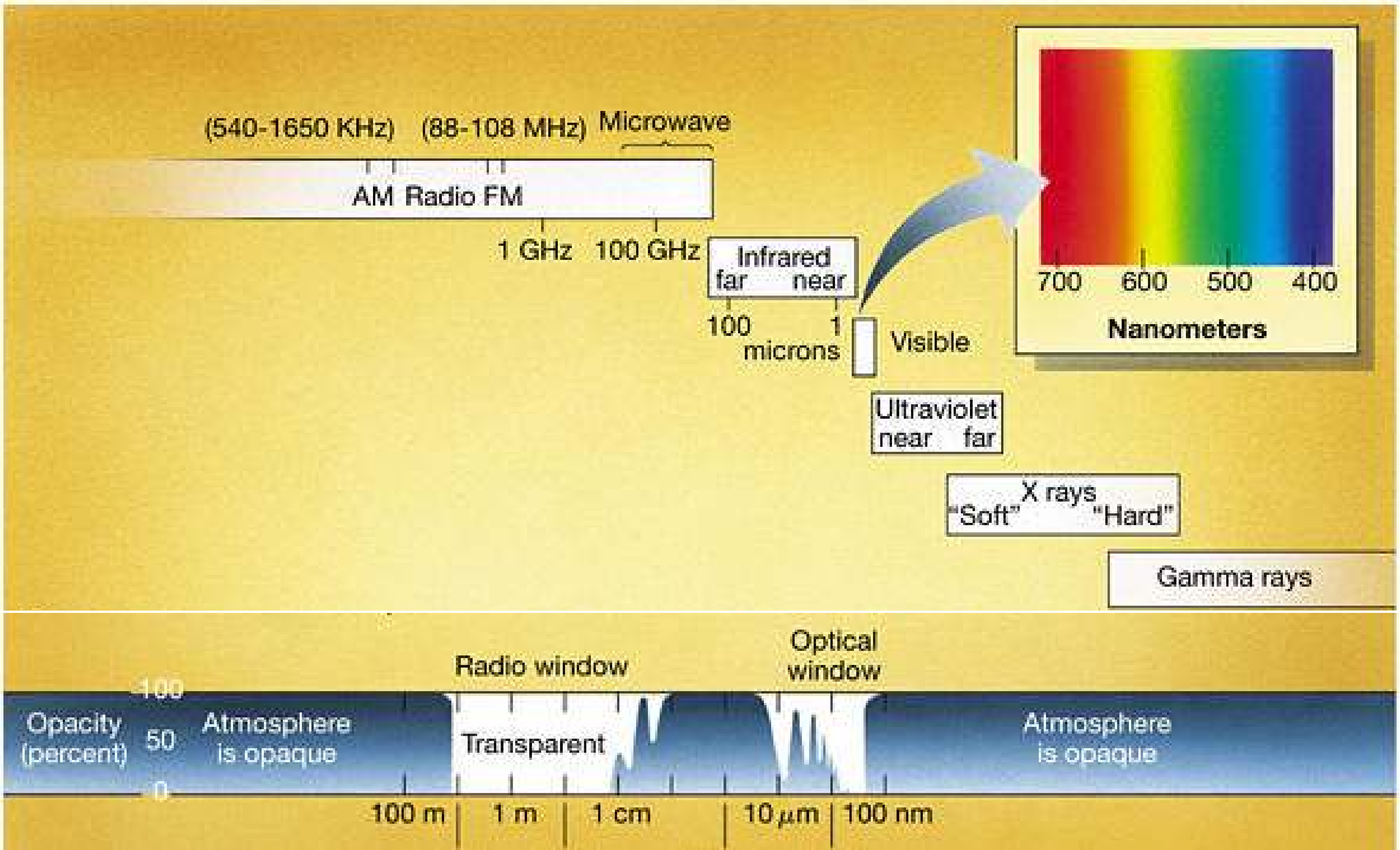


előállítás

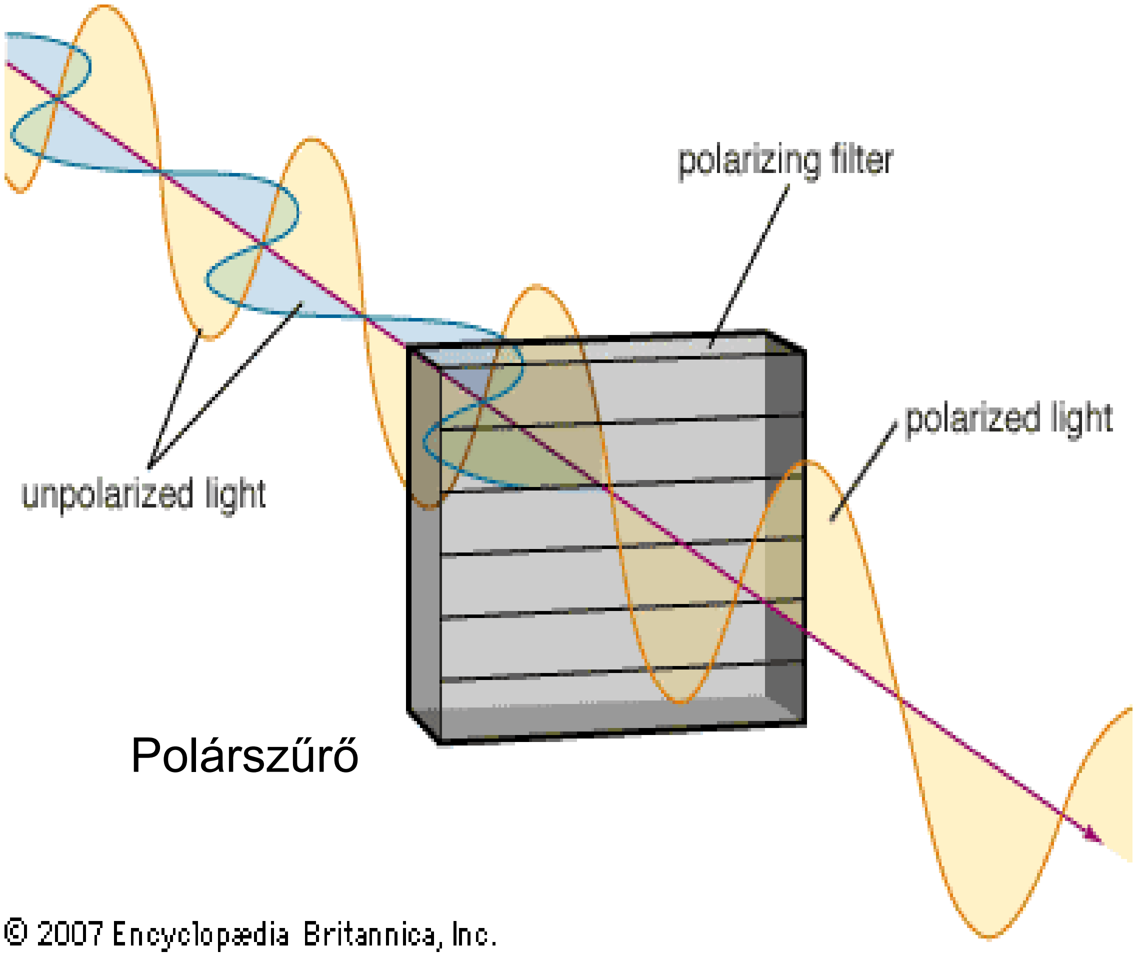
Az elekromágneses spektrum 2.



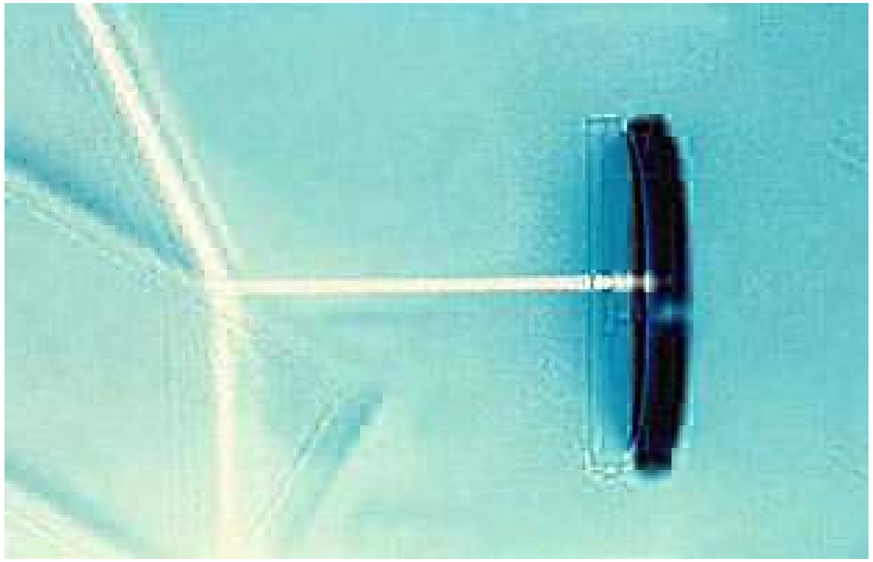
Az elektromágneses spektrum 3.

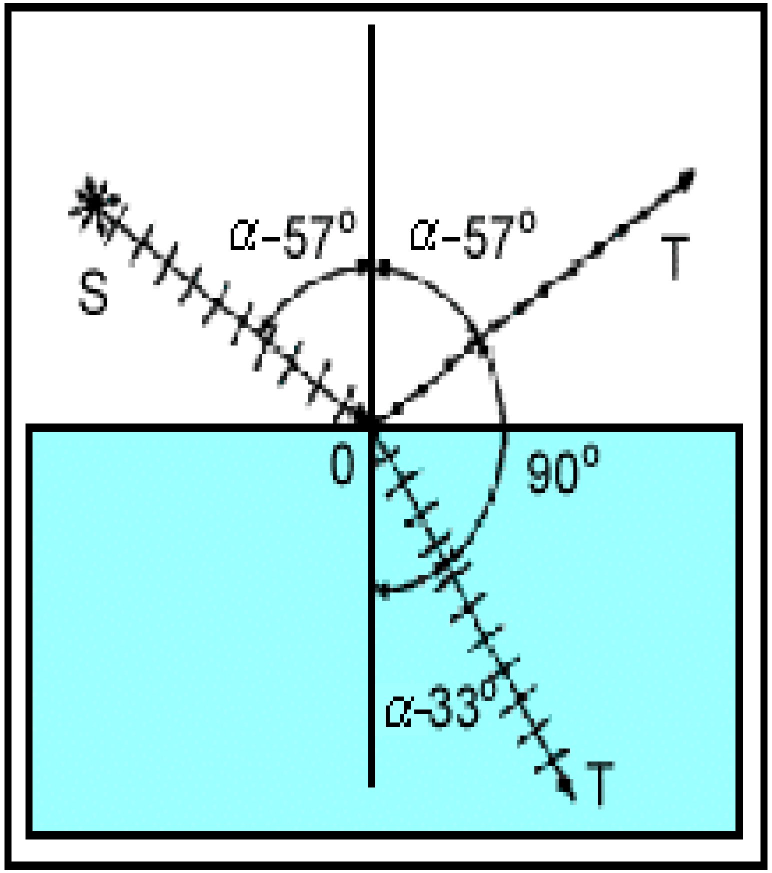


Polarizált fény előállítása



Brewster törvénye

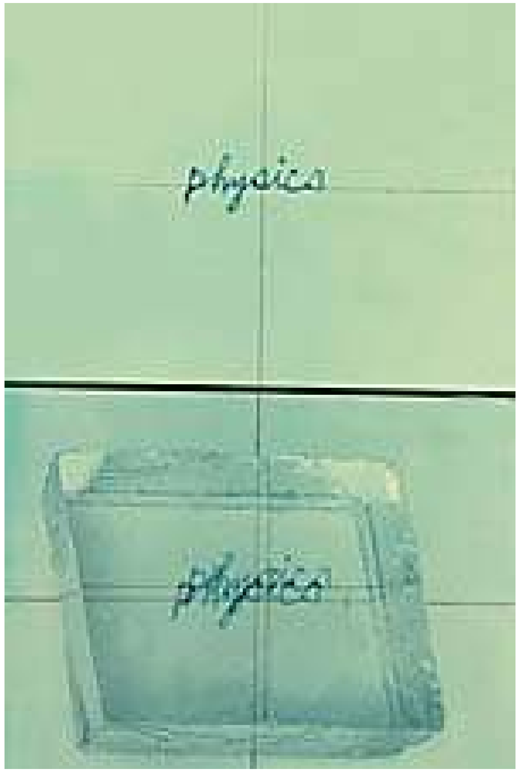


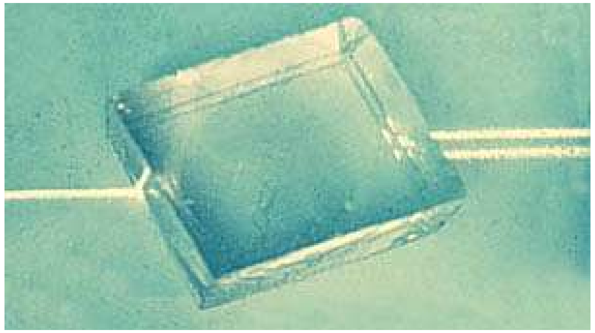


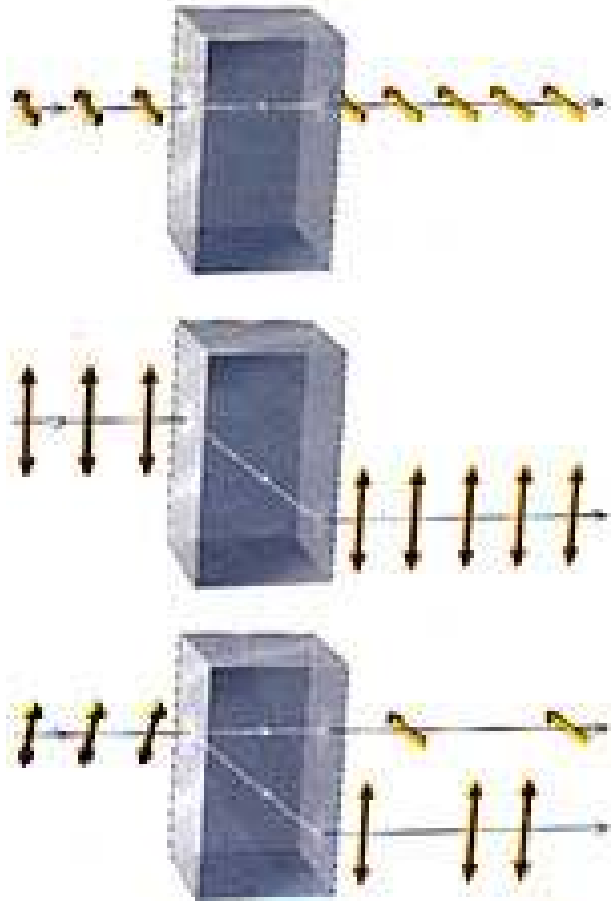
Vízfelszínről visszaverődő fény poláros
Madarak képesek ezt érzékelni!

Üvegről visszavert fény

Kettős törés

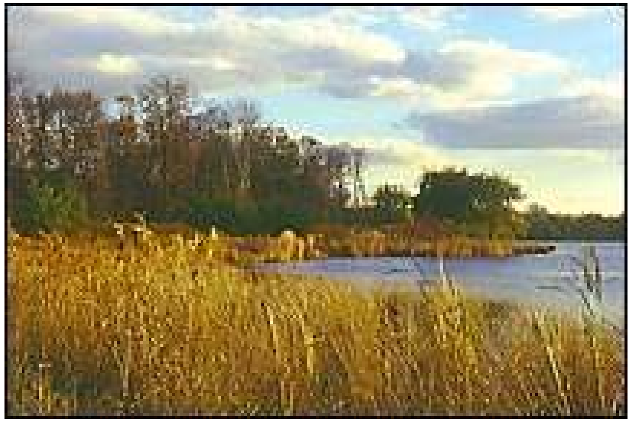


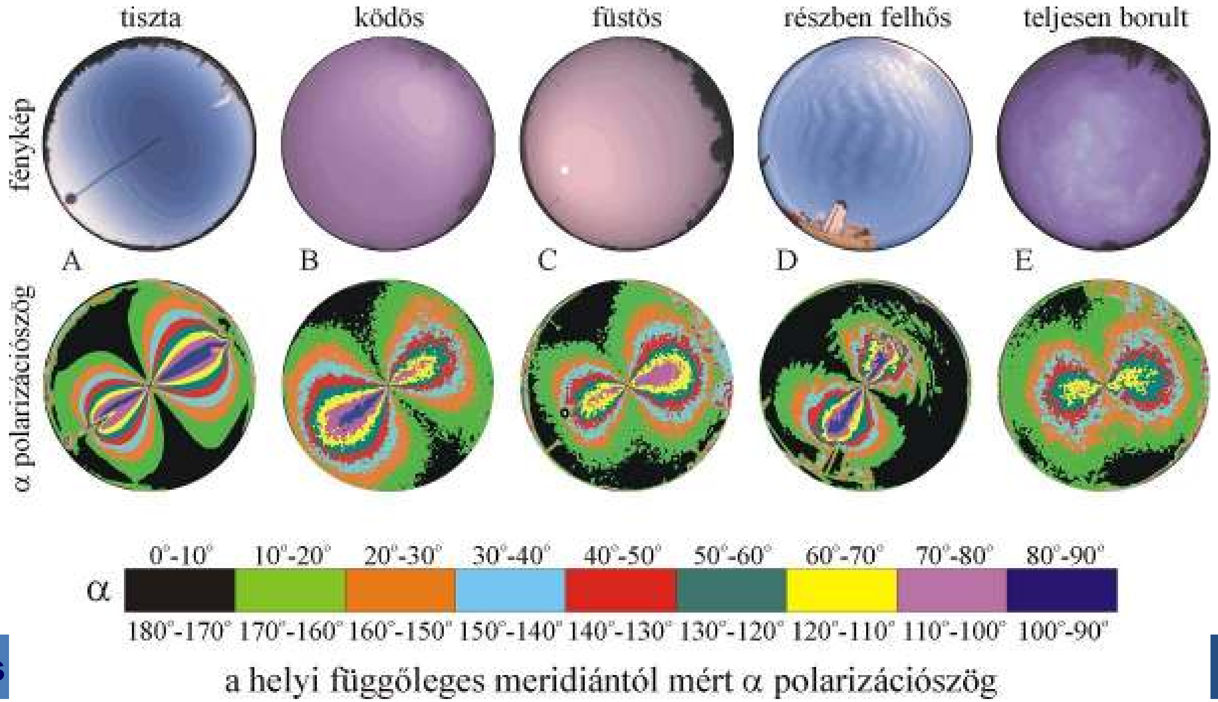




http://www.mozaik.info.hu/MozaWeb/Feny/page23.htm

Az égbolt polarizációja





Optikai aktivitás

Olyan anyag amely a lineárisan poláros fény rezgési síkját elforgatja
(aminosavak, cukor)
A biológiai molekulák mindig balra forgatják a síkot (L-izomer)