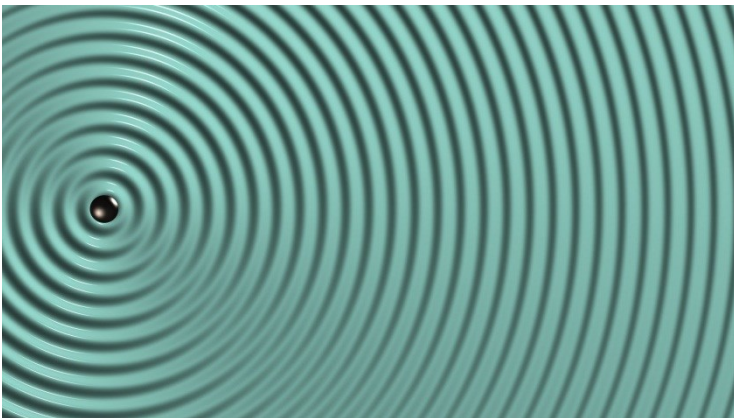
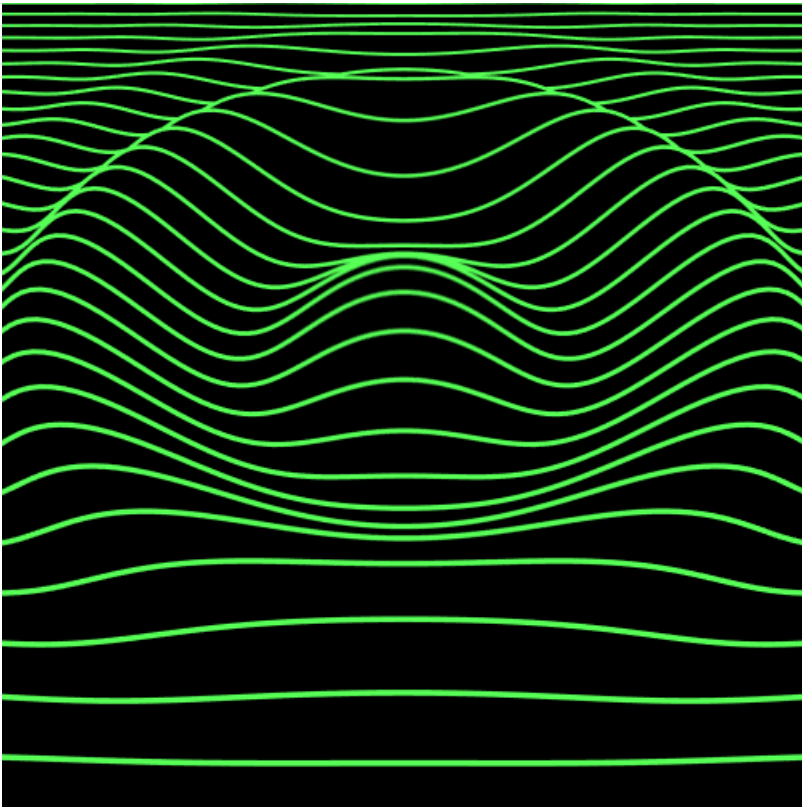


Hullámoptika

nem csak optikában vannak hullámok...



G.Schay

az egyes részecskék helyhez kötött periodikus mozgást végeznek, csak a „hullámfront” halad!

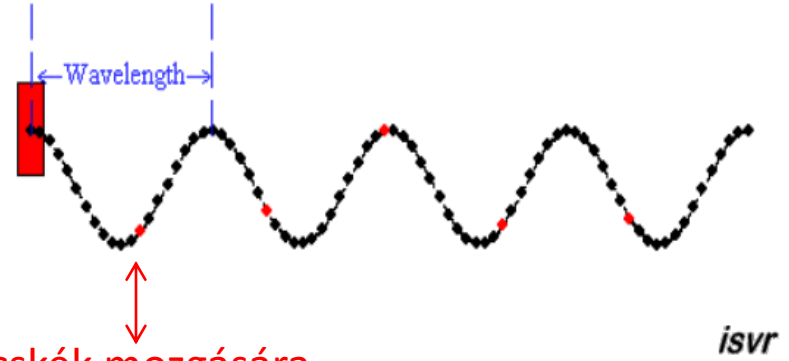
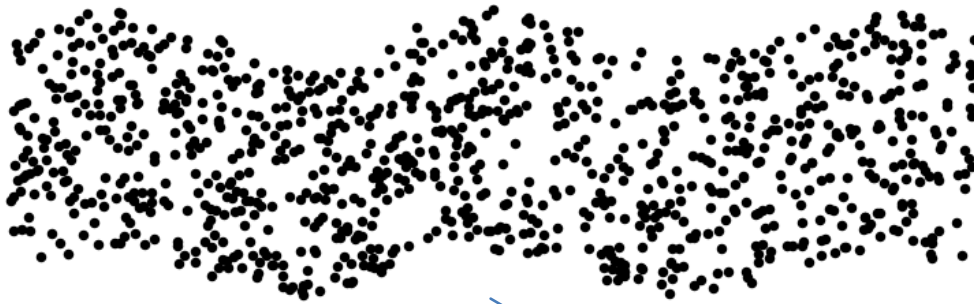
Vízfelszíni hullámok

©2016, Dan Russell

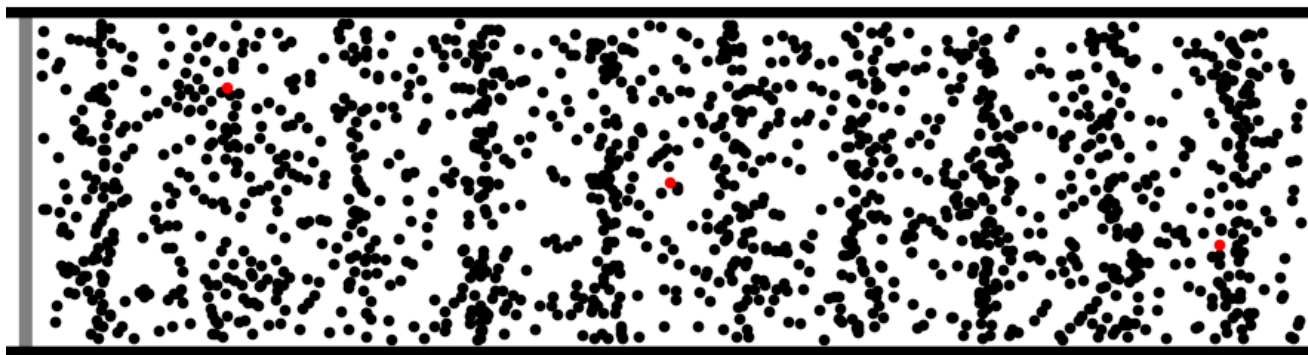


a hullám haladása azt jelenti, hogy a részecskék mozgás-állapota terjed tovább.

transzverzális hullám



A hullámfront haladási iránya merőleges a részecskék mozgására



Longitudinális hullámok:
A hullámfront haladási iránya
párhuzamos a
részecskék mozgásával



$$y(x,t) = A \cdot \sin(k \cdot x + \omega \cdot t + \phi)$$

ahol y a kitérés,

A az amplitúdó, k a hullámszám és ω a szögsebesség.

$\omega = 2\pi f$, és $f = 1/T$ [Hz], T a periódusidő.

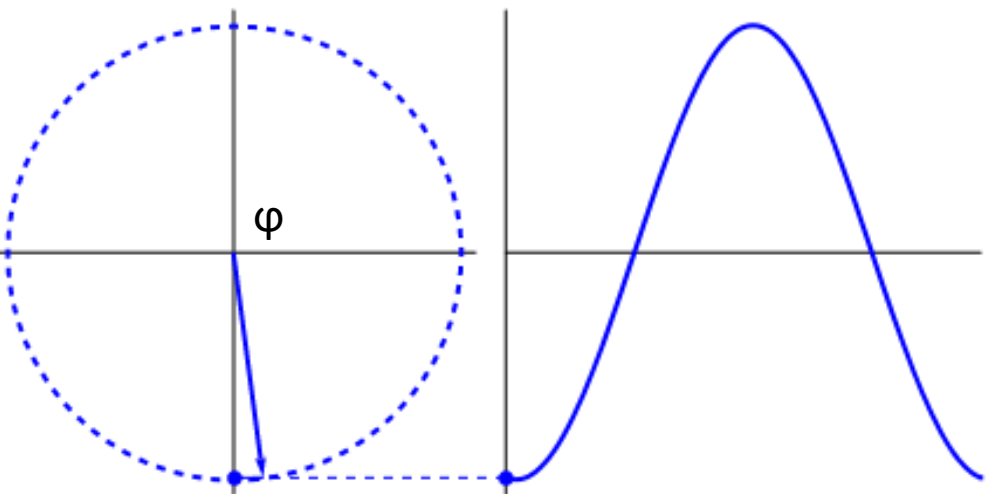
$\omega = c \cdot k$ adja meg a hullámszámot, azaz $k = 2\pi/\lambda$.

ahol λ a hullámhossz.

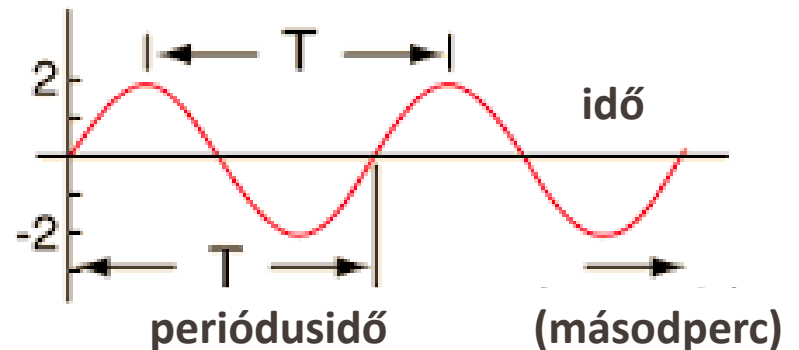
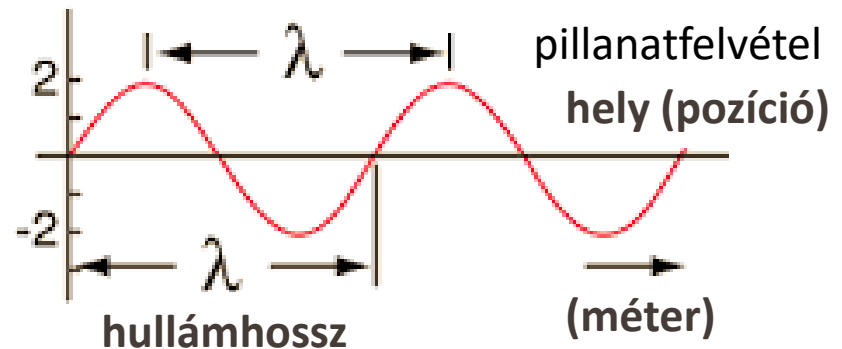
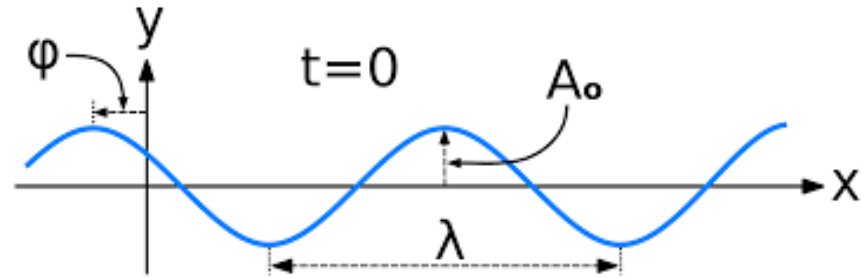
$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

a sin-os hullám egy kör mentén való forgással is leírható (szögsebesség, egy teljes kör 2π).

itt a **fázis** a pillanatnyi állapot a kör mentén: ϕ

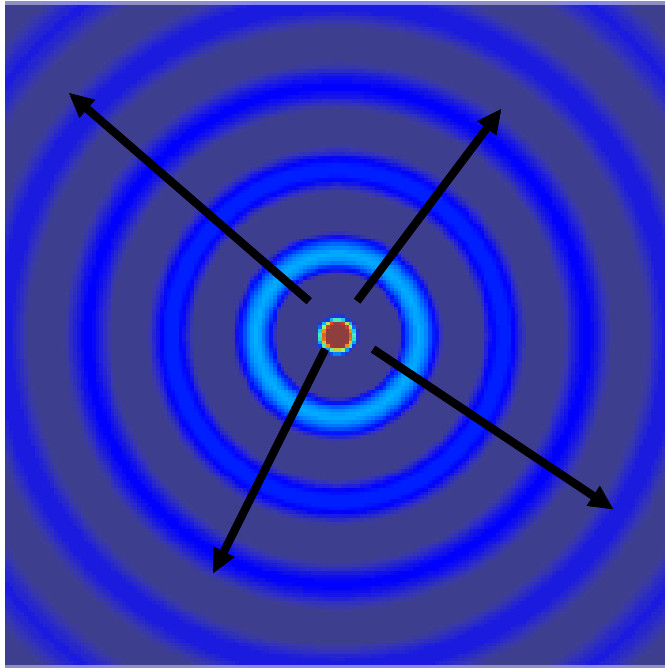


grafikusan

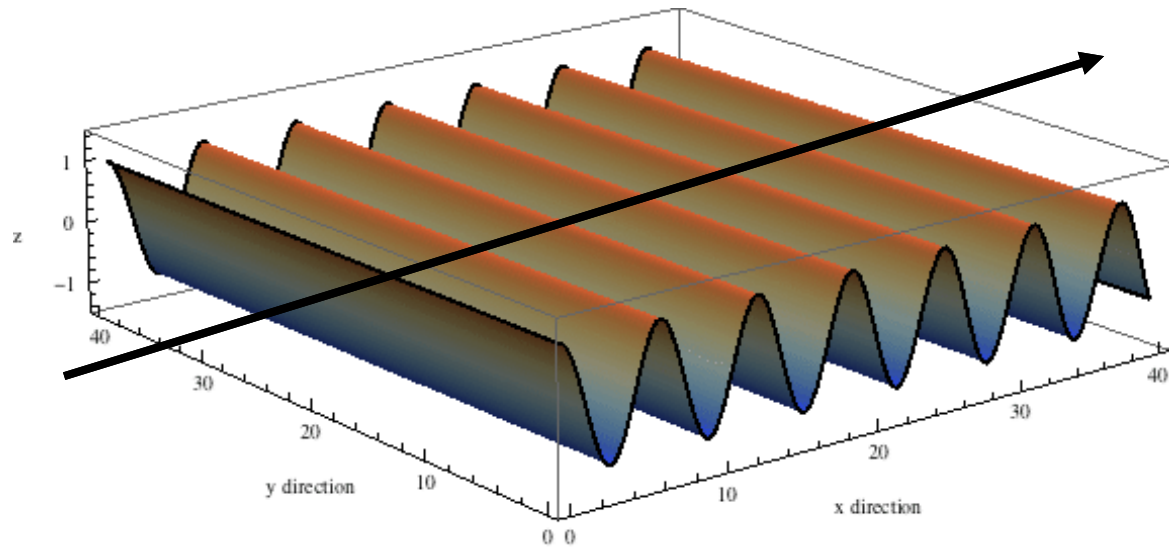


egy adott pontban az időbeli változás

pontszerű hullámforrás, homogén közegben
(tehát mindenfele egyformán terjed)



kör- vagy gömbhullám



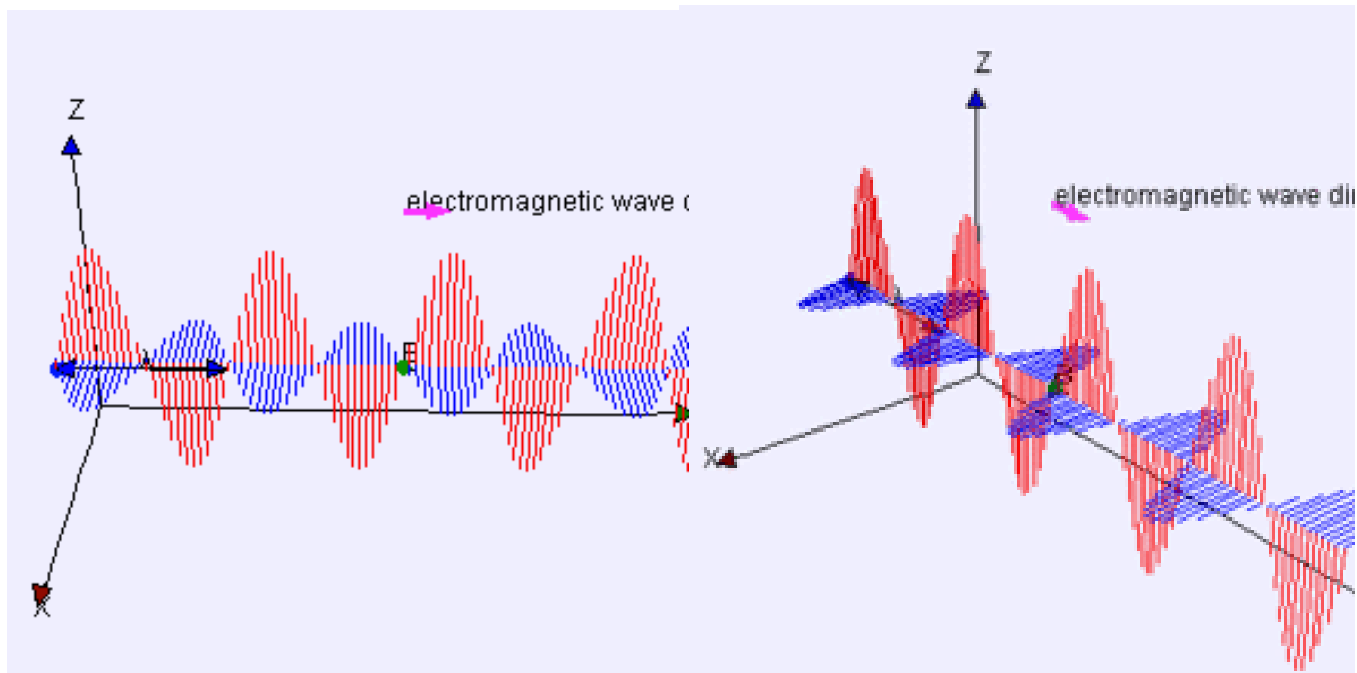
síkhullám

terjedési irány
"fénysugár" a geometriai optikában



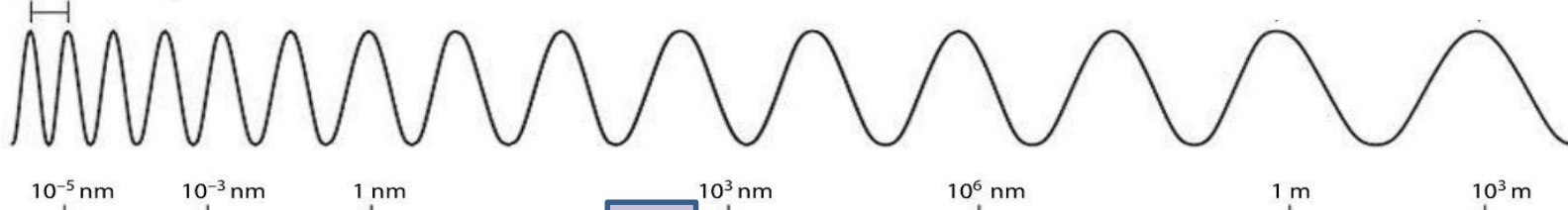
A fény elektro-mágneses hullám

két hullám együtt: elektromos tér (**E**) és mágneses tér (**B**) együttes hullámozása



rövid hullámhossz

hosszú hullámhossz



gamma

röntgen

UV

Infravörös

rádió

mikrohullám

nagy frekvencia

alacsony
frekvencia

látható fény

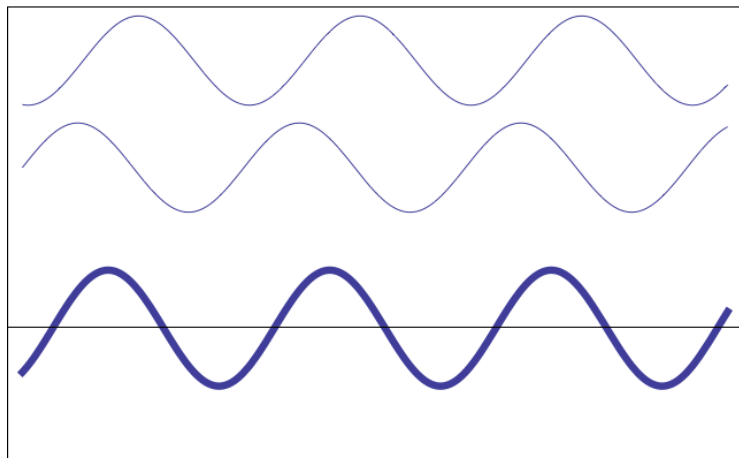
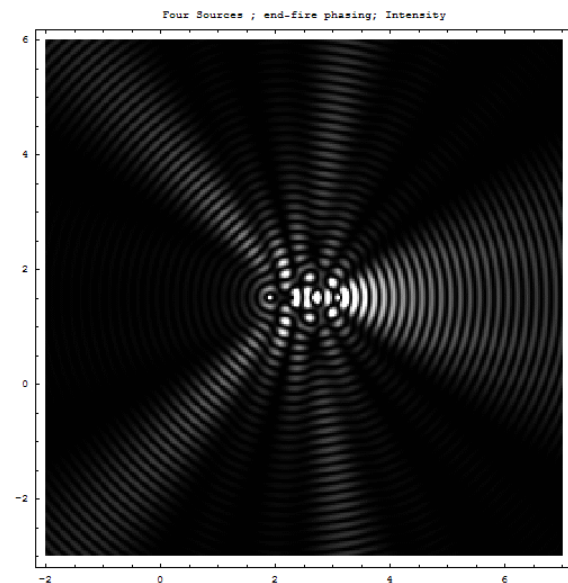
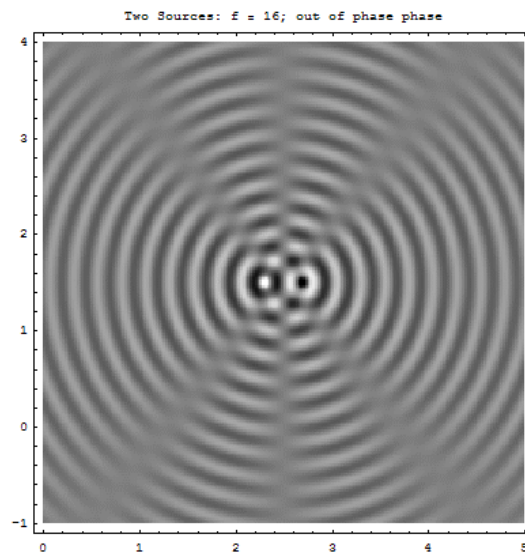
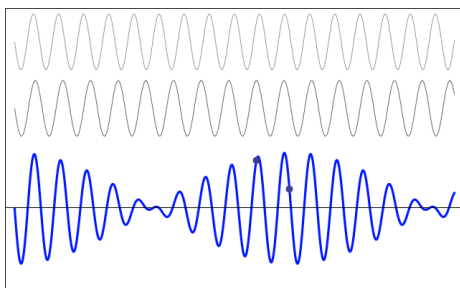
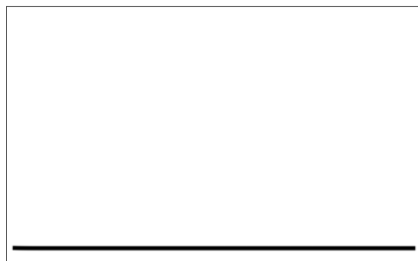
7×10^{14} Hz

4×10^{14} Hz

Hullámok szuperpozíciója: a „kitérés”ek amiket az egyes hullámok okoznak összeadódnak.

$$y(x,t) = A_1 * \sin(k_1 * x + \omega_1 * t + \phi_1) + A_2 * \sin(k_2 * x + \omega_2 * t + \phi_2) + \dots$$

kivéve ha extrém nagy amplitúdók vannak, akkor egyéb effektusok jelennek meg: nemlinearitás.

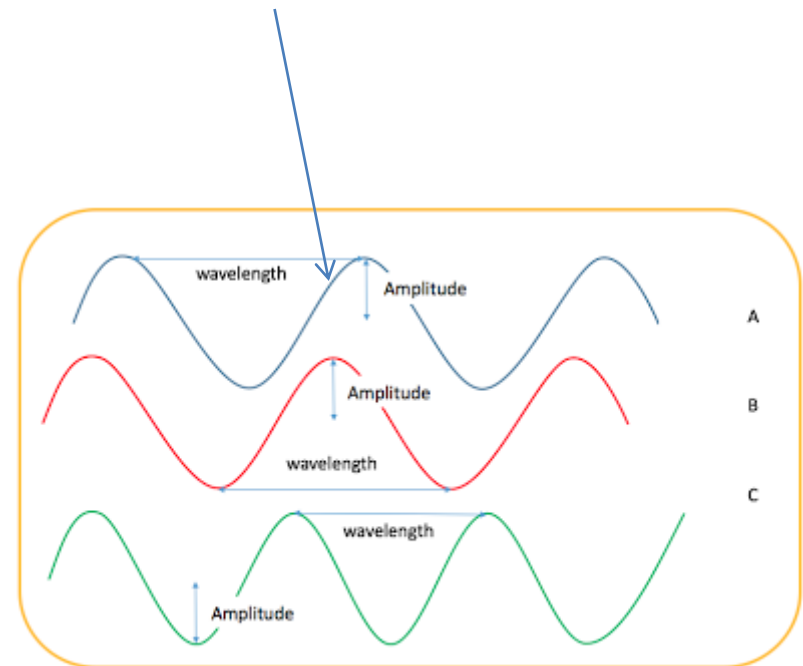
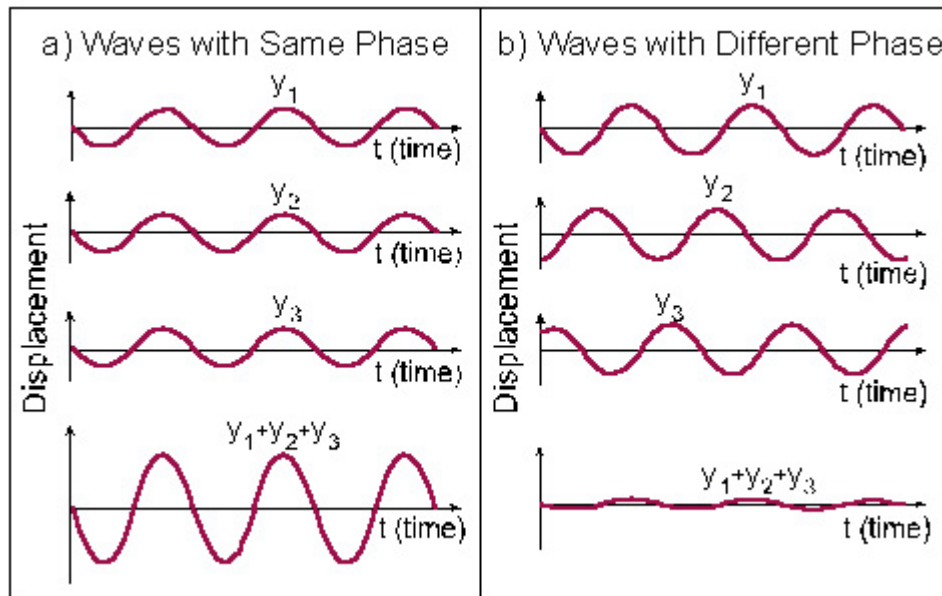


<https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/superposition/superposition.html>



Koherens hullámok: az egyes hullámok közötti **fázis-eltérés** időben állandó.

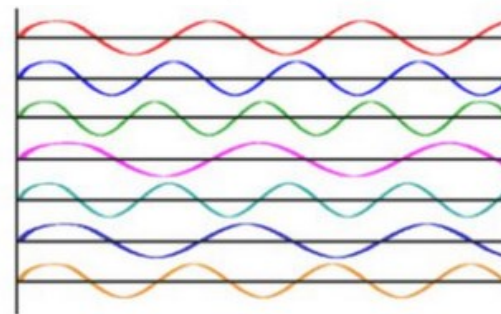
koherens hullámok ki tudnak alakítani időben stabil mintázatot



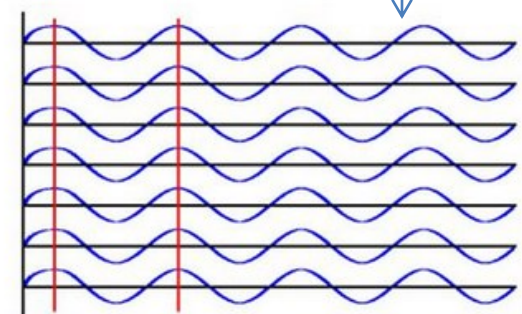
ha a fázis eltérés 0 (vagy 1,2,3.. * 2π),
konstruktív interferencia lép fel.

Konstruktív interferencia:
„maximum – maximummal”

Destruktív:
ellentétes fázisban találkoznak



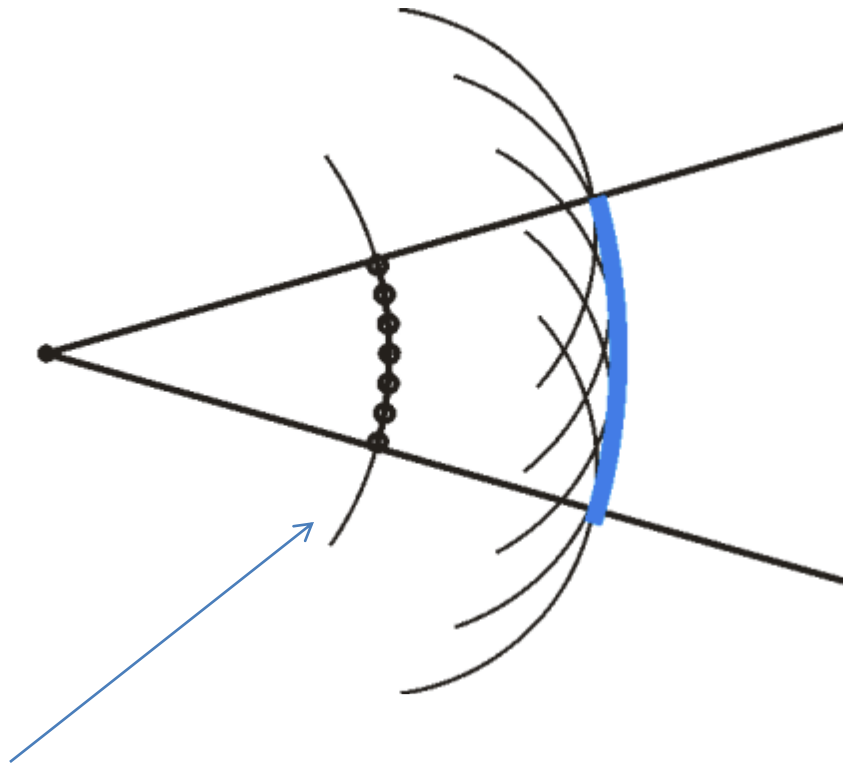
Incoherent light waves



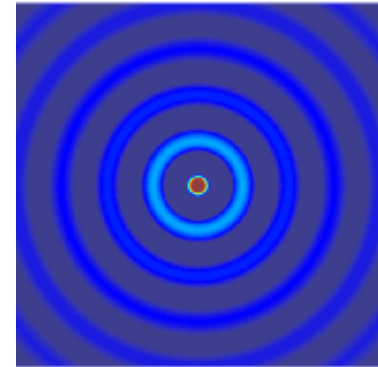
Coherent light waves

A Huygens-Fresnel elv

Minden hullámterjedés felbontható sok elemi gömbhullám összegére, melyek egymással interferálnak.



hullámfront: azonos fázisú pontok halmaza (pl a maximumok)



Christiaan Huygens
(1629-1695)

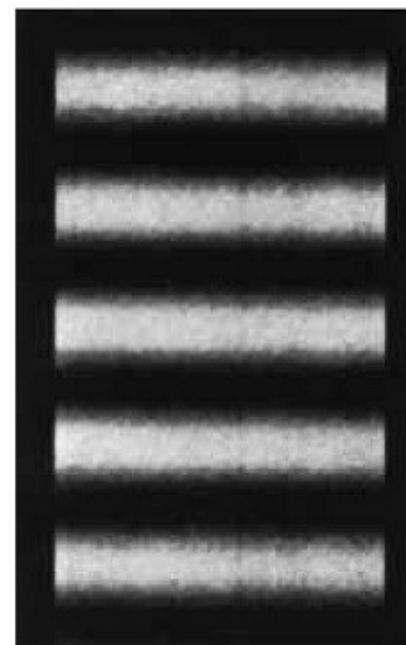
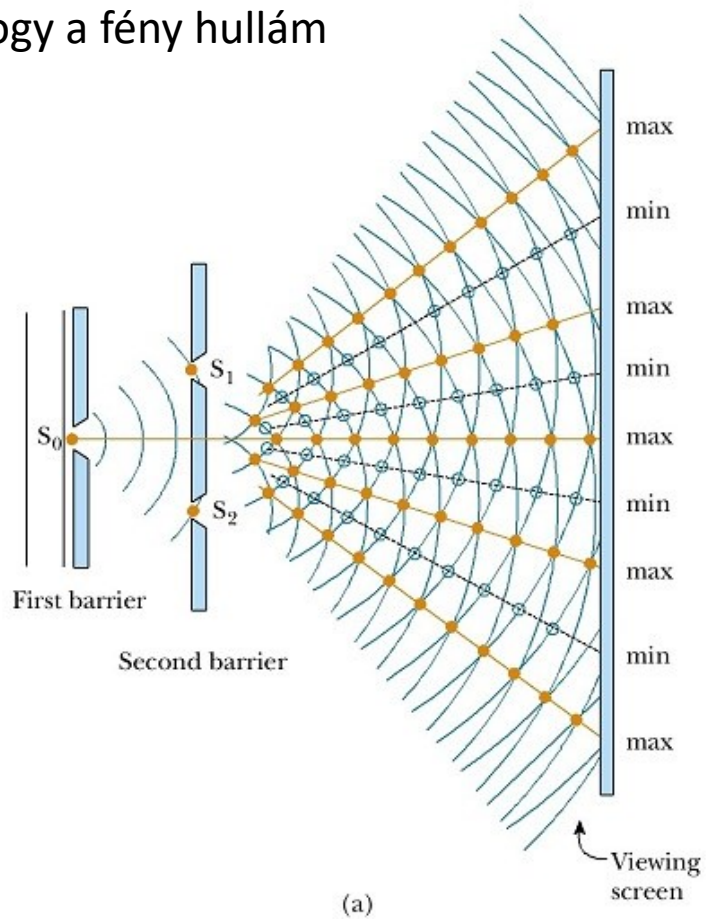


Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)

Kísérletek amiket csak a hullámtan magyaráz meg

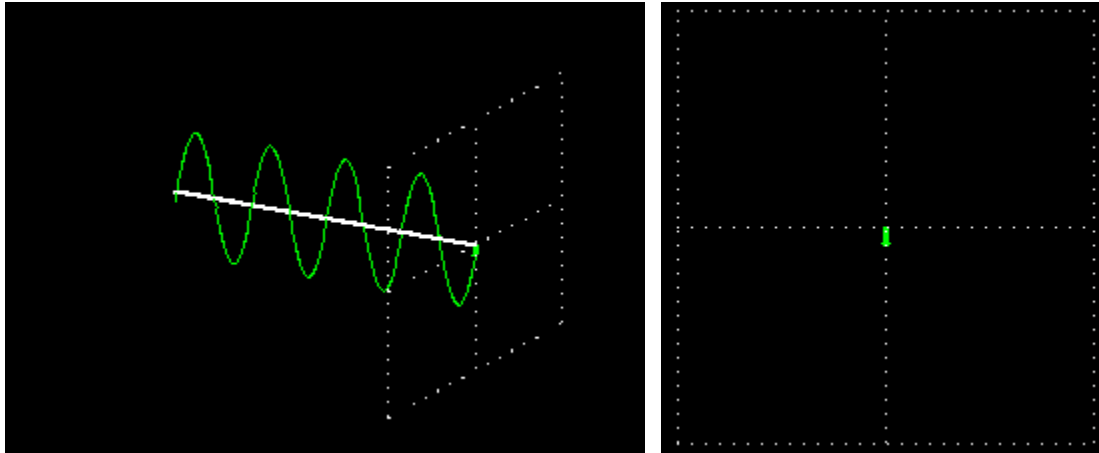
Young-féle két-réses kísérlet

ez bizonyítja hogy a fény hullám

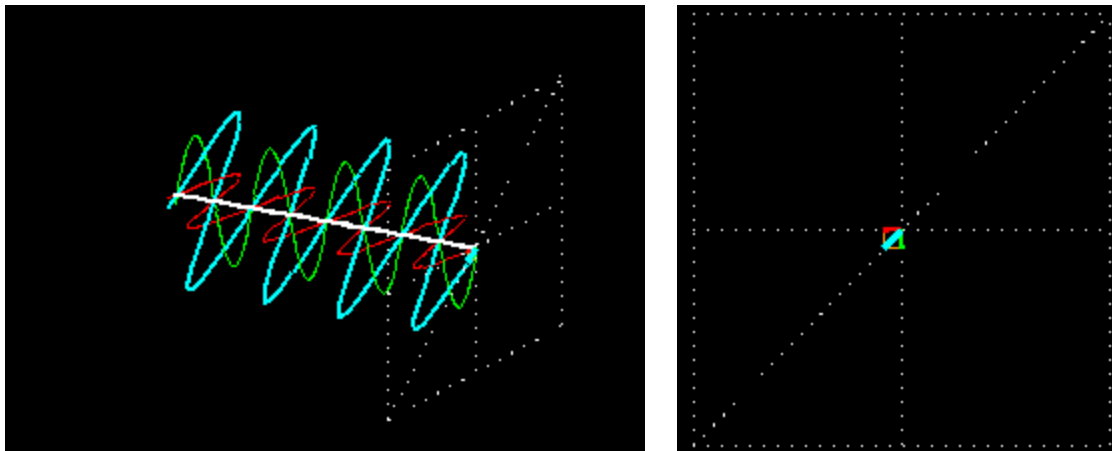


Thomas Young

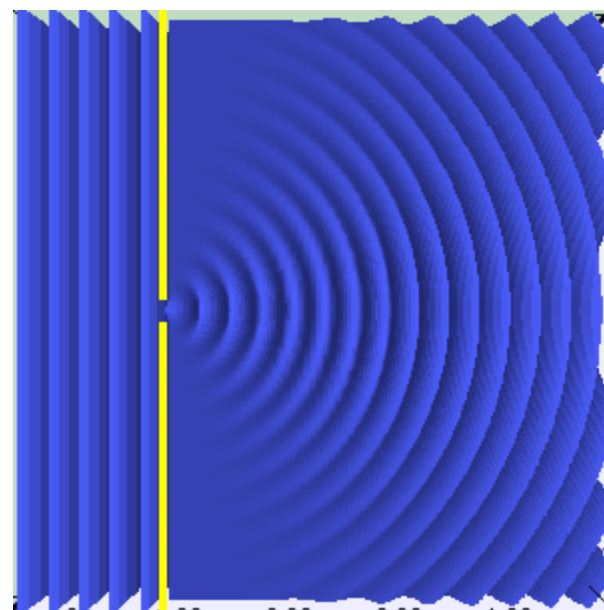
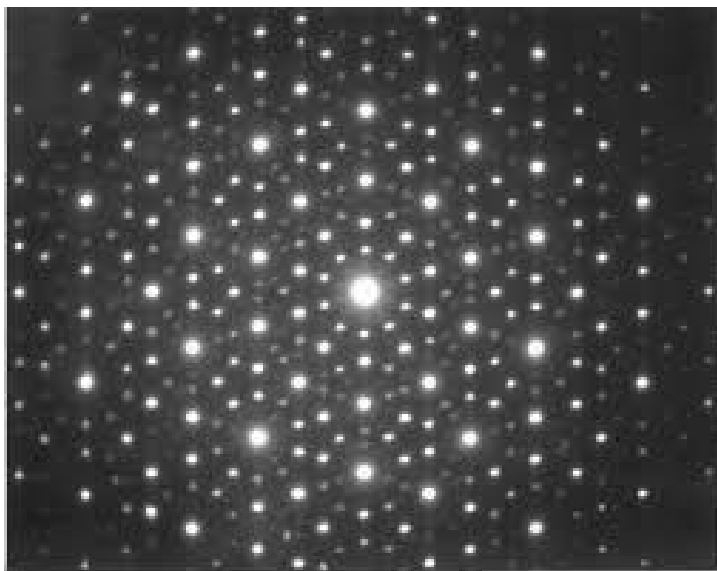
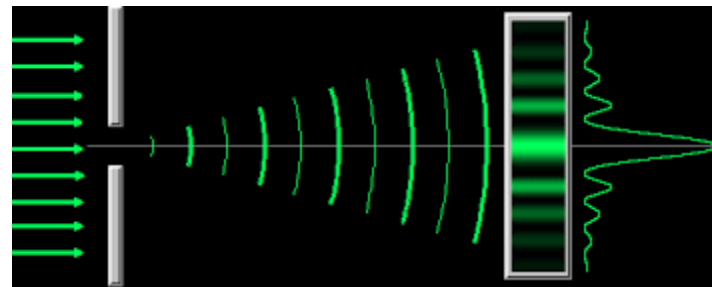
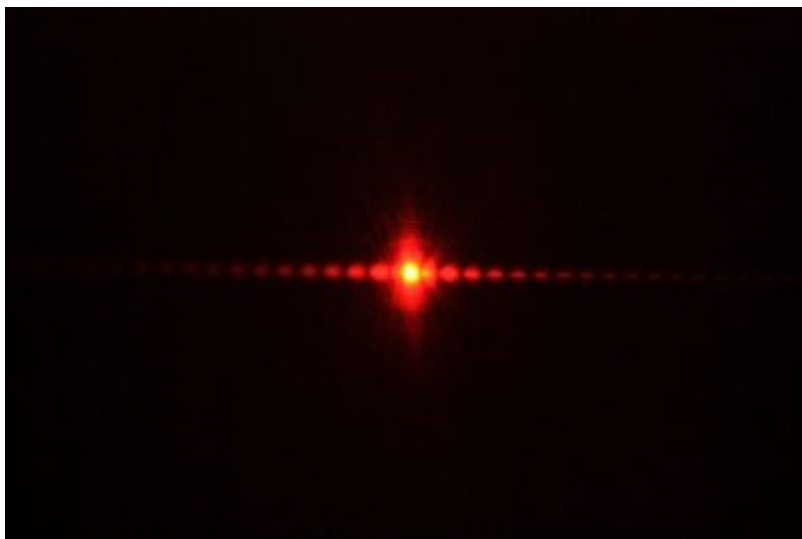
Általában csak az E teret rajzoljuk le, mivel a B úgys merőleges rá, így az ábrák egyszerűbbek lehetnek. DE ettől még mindig mindkettő jelen van!



ha két eltérő állású E-vektort adunk össze:



Diffrakciós mintázatok koherens fénnyel. (lézerekkel lehet jól látni)

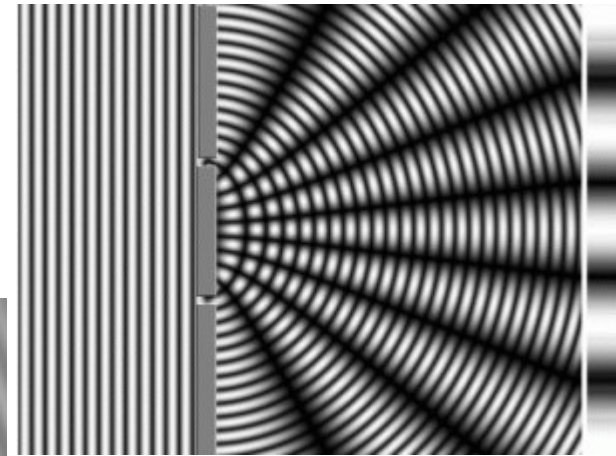
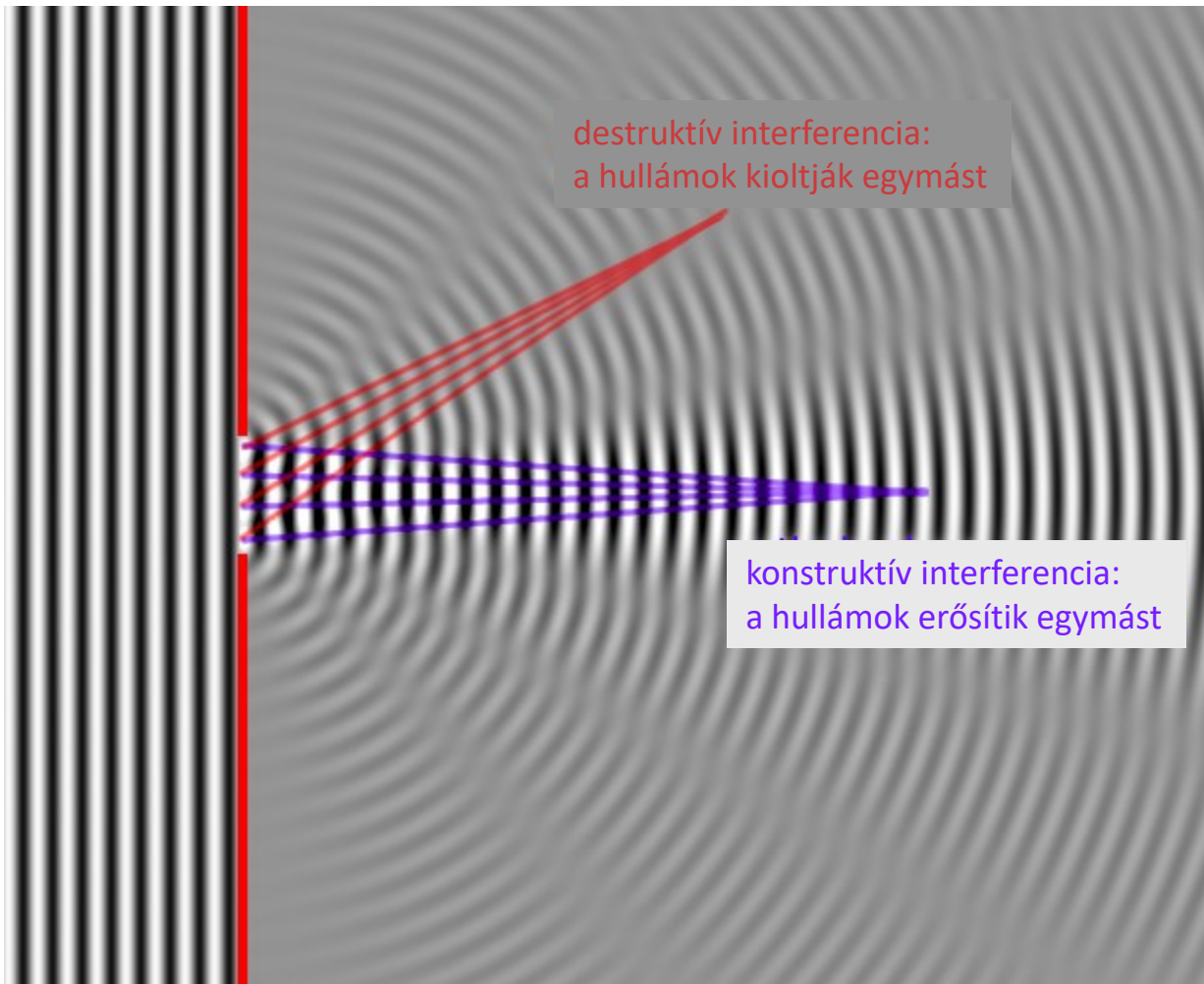


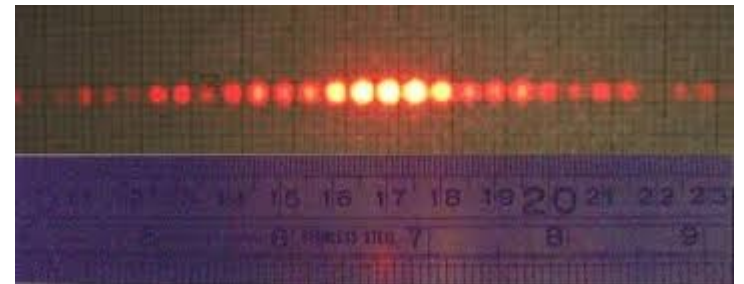
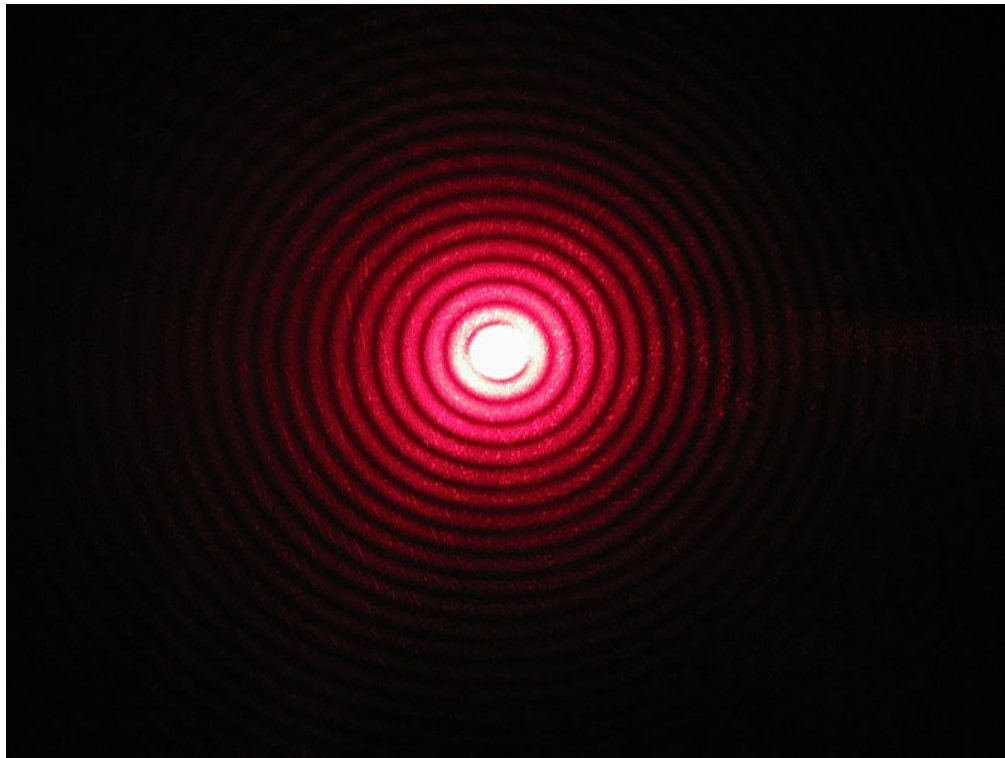
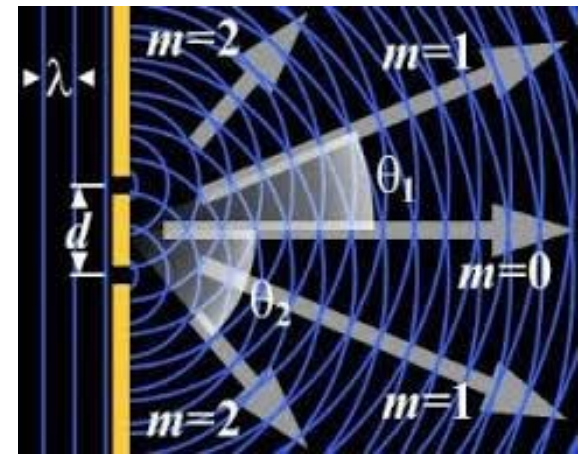
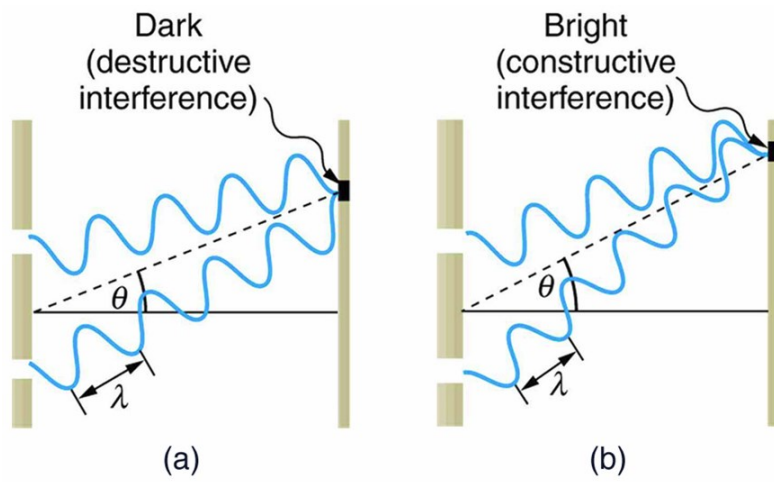
rtg diffrakció



Diffrakció a vízen is előfordul...

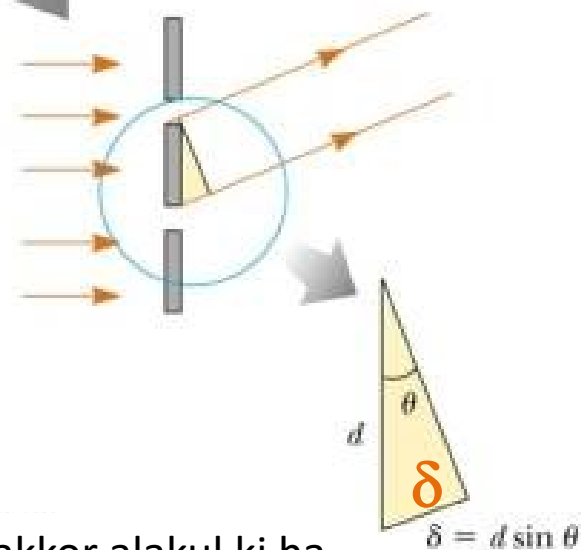
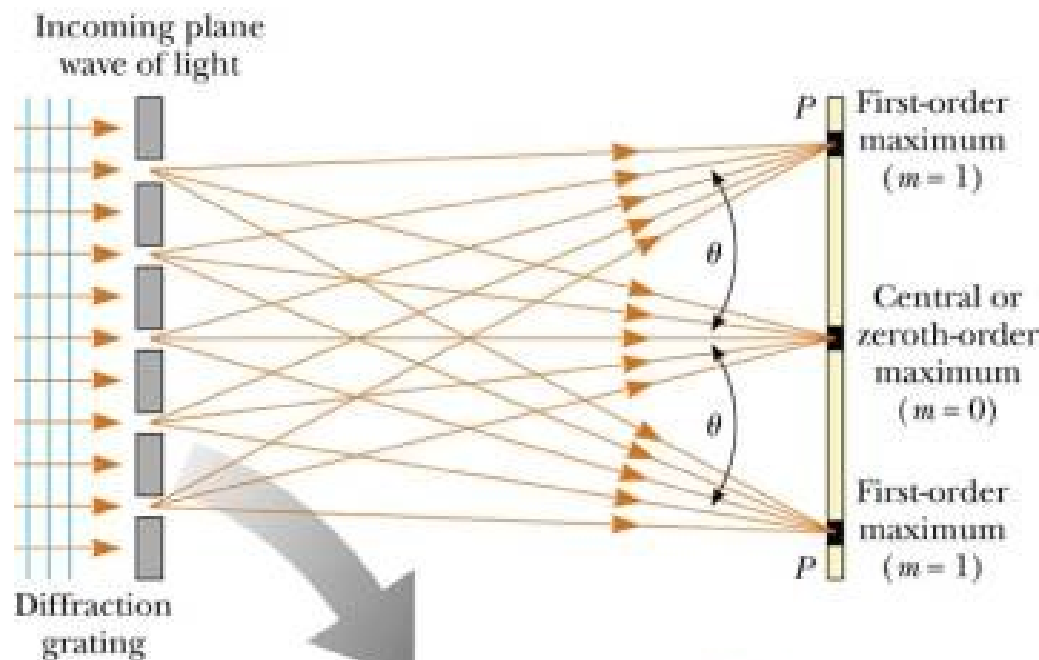
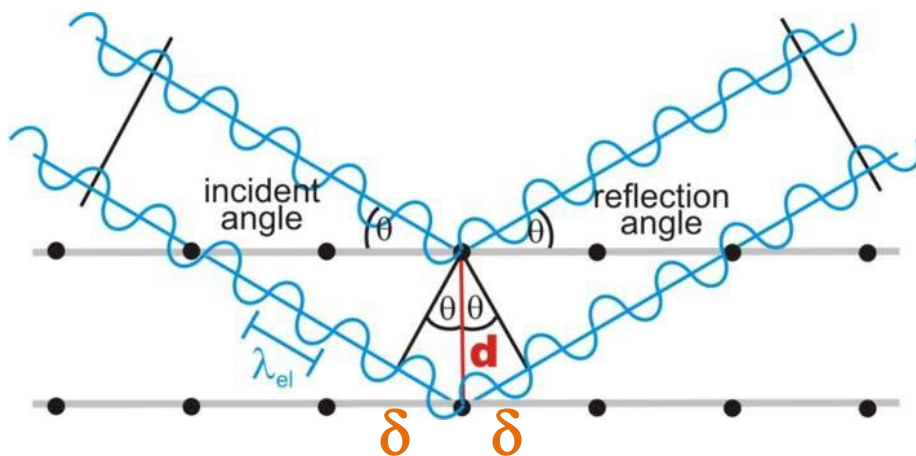
A mintázatok úgy alakulnak ki, hogy az összegzéskor időben állandóan egy-egy helyen kioltás vagy erősítés következik be.





Elhajlás optikai rácson:

A reflexiós rácson az útkülönbség kétszer jelenik meg, így $2\delta = \lambda$ (vagy egész számú többszöröse)

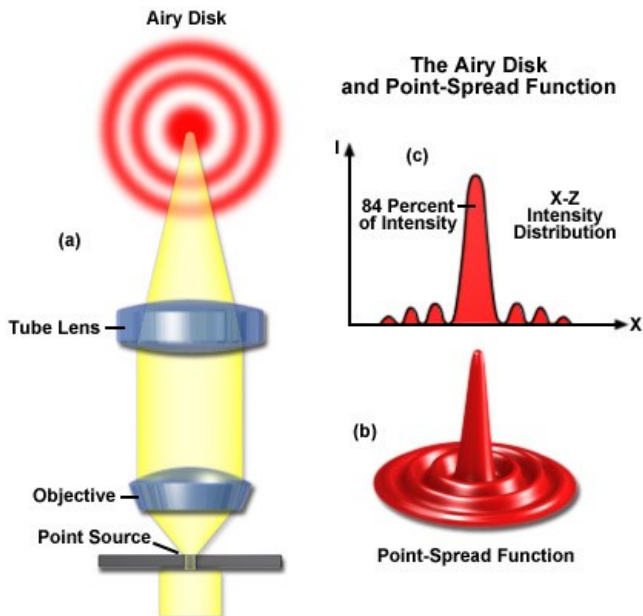
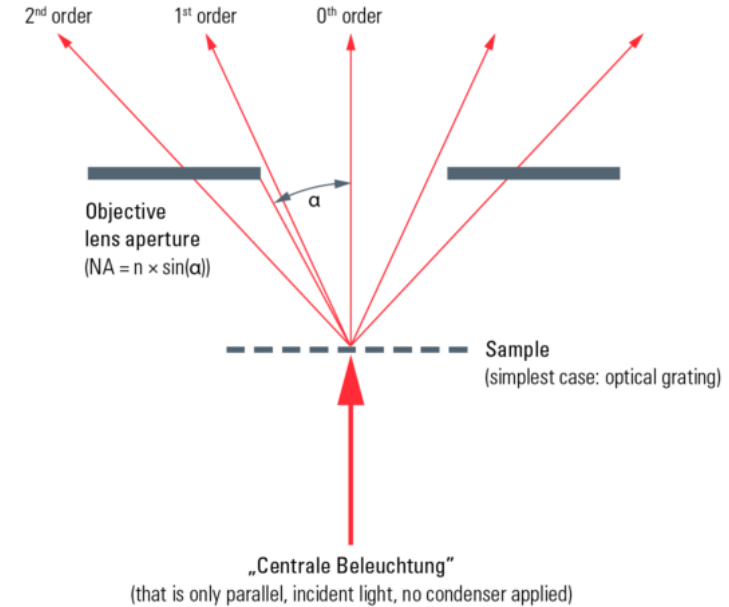
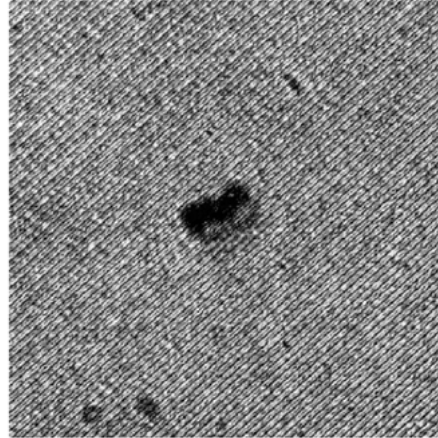


Konstruktív interferencia akkor alakul ki ha a fáziseltérés $0, 1, 2, 3, \dots \cdot 2\pi$. Tehát δ -nak $0, 1, 2, 3, \dots \cdot \lambda$ nagyságúnak kell lennie.

A fénymikroszkóp felbontóképessége a hullám-elhajlás miatt korlátozott

Abbe elv

csak akkor kapunk képet a tárgyról a mikroszkópban, ha legalább az előrendű diffrakciós maximum is bejut az objektívbe és résztvesz a képképzésben.



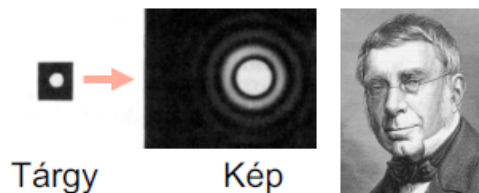
$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$



Ernst Abbe
(1840-1905)

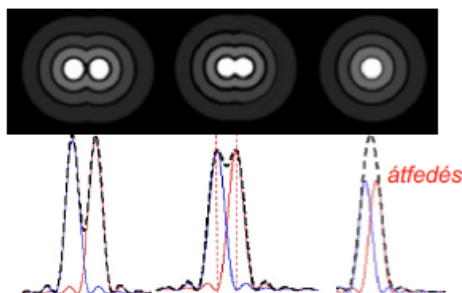
modern verzióban: $\delta = 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \omega}$

Diffракció miatt: pontszerű tárgy képe elhajlási korong (Airy korong)



Sir George Biddell Airy (1801-1892)

Rayleigh feltétel: a tárgypontok feloldhatók, ha nincs túl nagy átfedés a képek között



Lord Rayleigh (1842-1919)

Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-képlet):

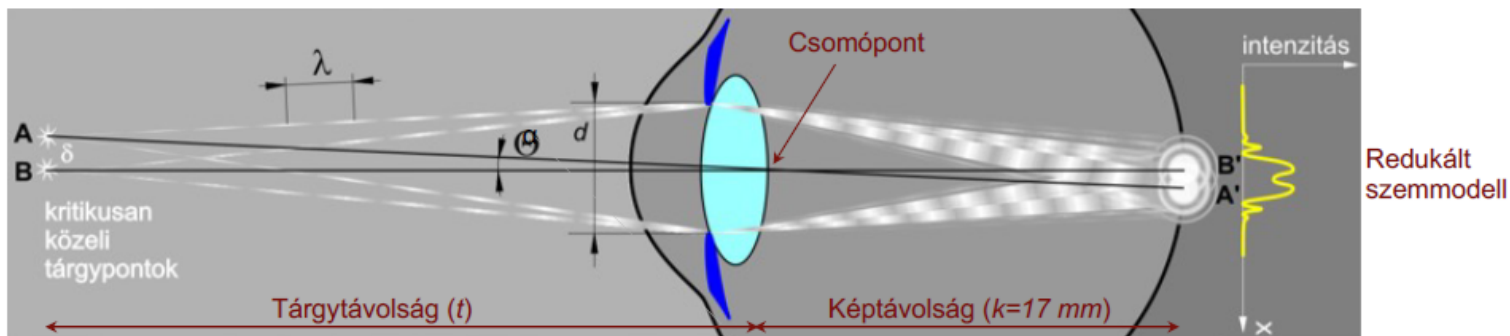
$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

λ = hullámhossz
 n = közeg törésmutatója
 α = optikai tengely és legszélső nyaláb által bezárt szög (félnyílásszög)



Ernst Abbe (1840-1905)

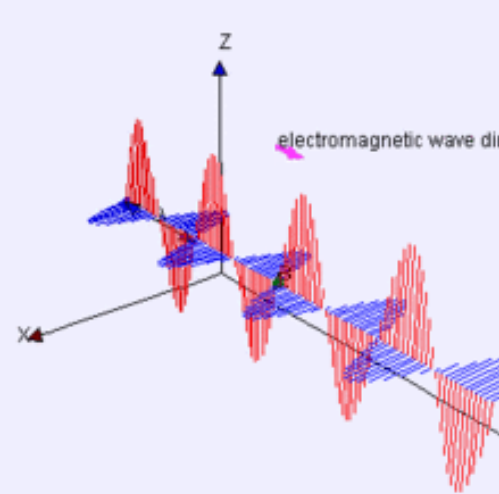
Az emberi szem hullámoptikai feloldóképessége:



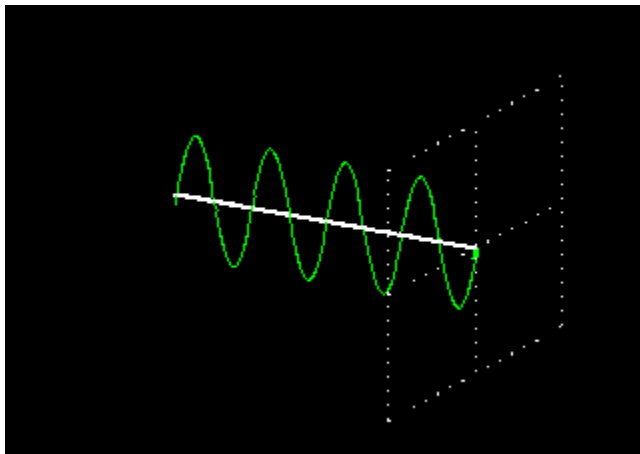
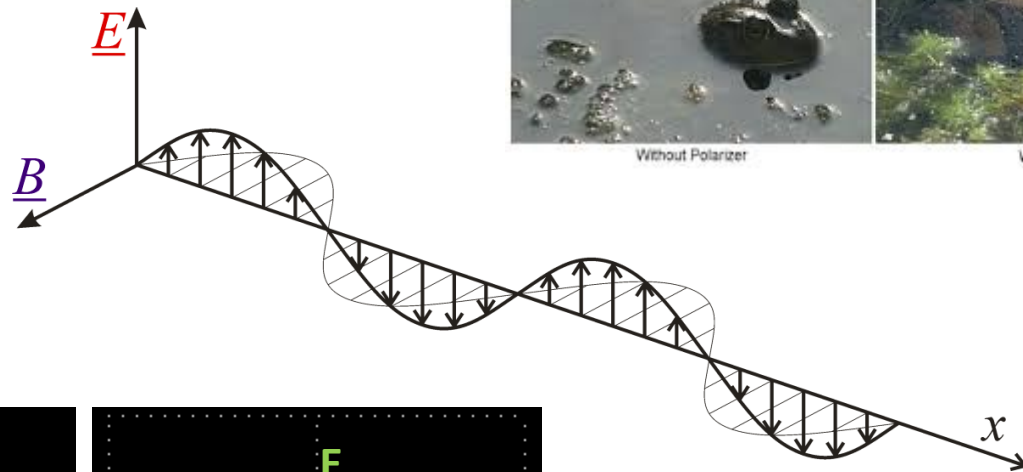
Látószöghatár: $\alpha_H = 1.22 \frac{\lambda}{d}$

Az a legkisebb látószög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól. Közepes hullámhossz (550 nm) és pupilla átmérő (4 mm) értékekre: 0.6' (szögperc)

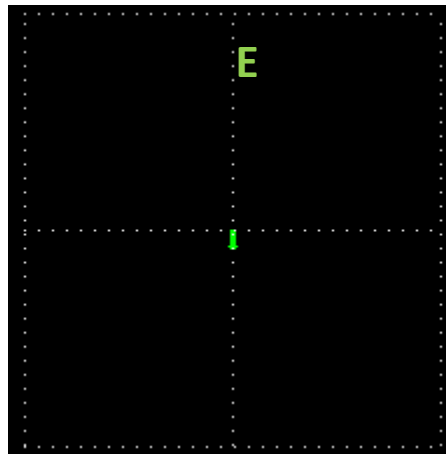
szem optikája gyakorlat



Polarizáció



Lineárisan polarizált fény

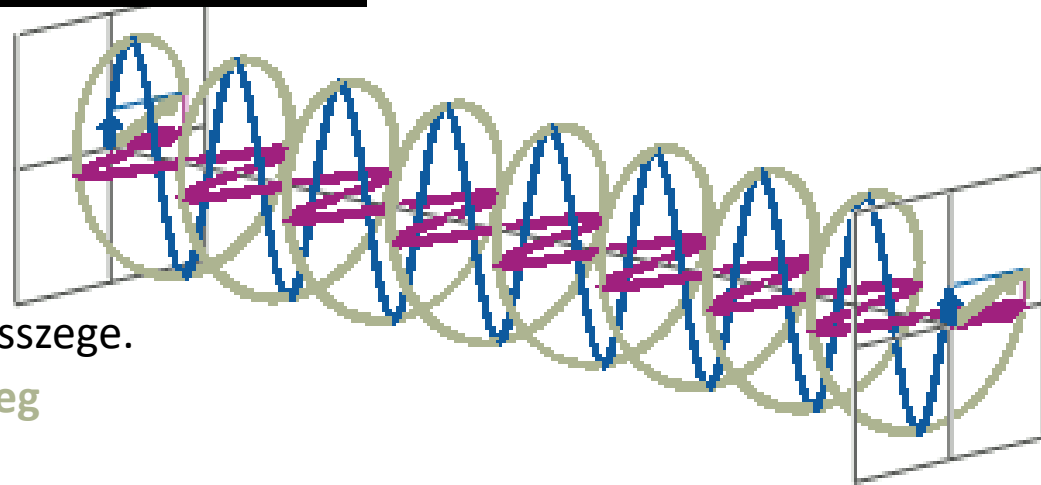


polarizációs irány: a fény *elektromos* hullámának iránya (az elektromos tér iránya)

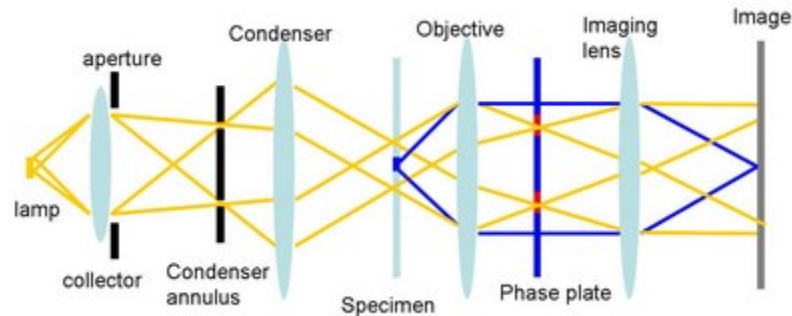
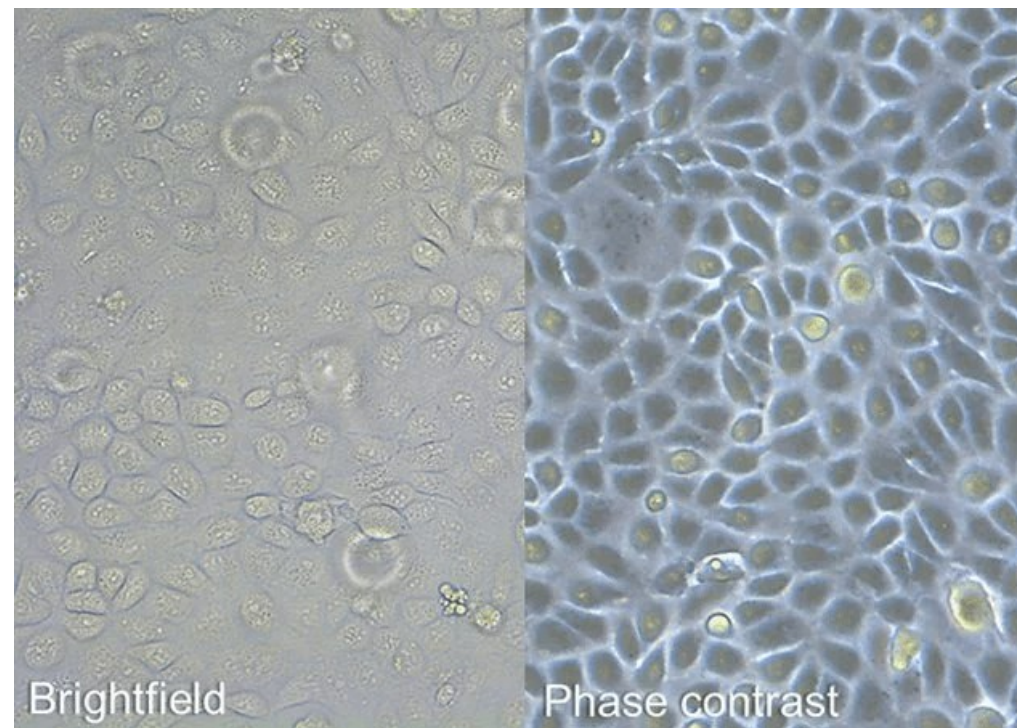
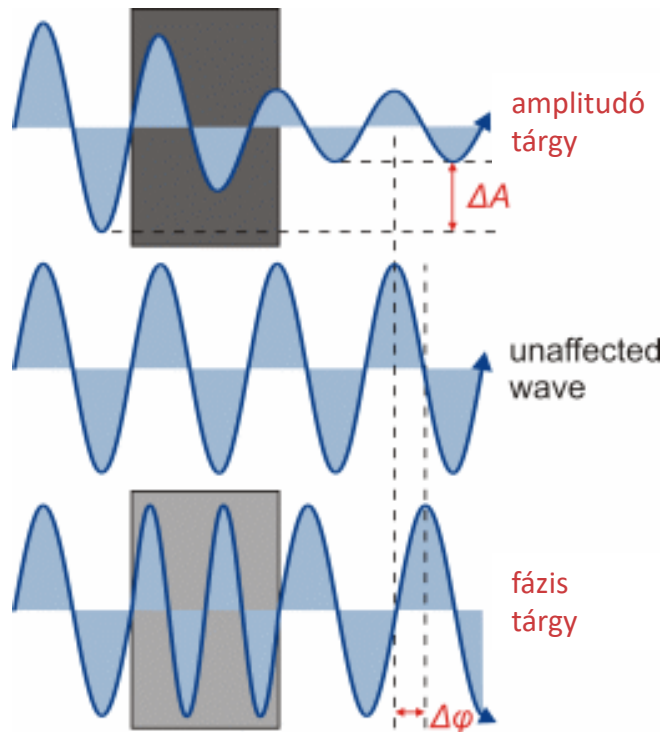
Cirkulárisan polarizált fény

két merőleges lineárisan polarizált fény összege.

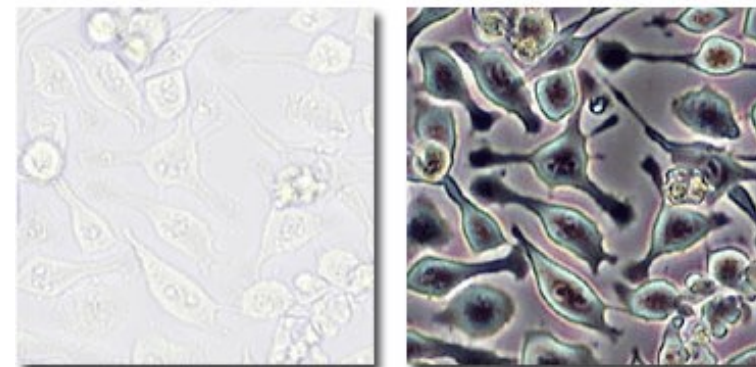
vertikális + **horizontális** = **forgó összeg**



Fáziskontraszt mikroszkópia



Az egyes elhajlási maximumok ügyes keverésével elérhető hogy ha a tárgyból kilépő fénysugarak különböző fázisú hullámokat tartalmaznak akkor a fáziseltérés a képen amplitúdó-eltérésként, azaz fényesség eltérésként jelentkezen.



van amit a hullámtan sem tud teljesen megmagyarázni:

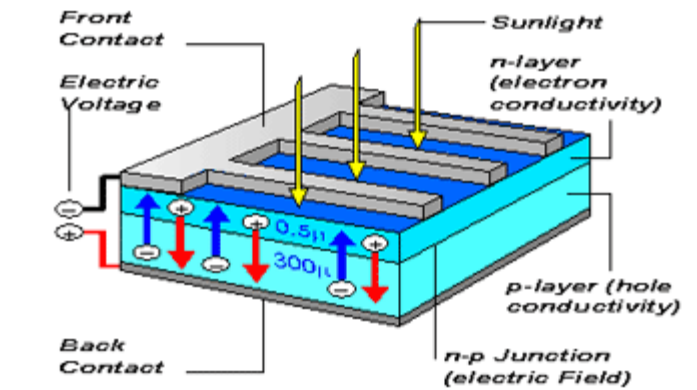
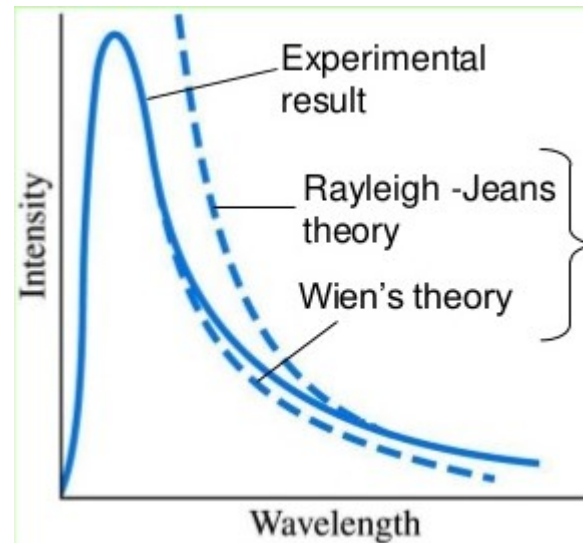
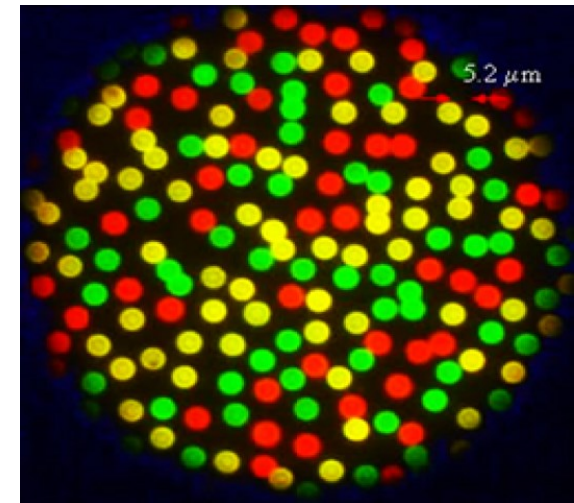
fényelektromos hatás

Kvantum pöttyök

fluoreszcencia

lézer

fekete test sugárzás



Back contact solar cell (Courtesy: ECN, The Netherlands)

-> A fény hullám **ÉS részecske** -> Kvantumfizika, Kvantumelektrodinamika
foton

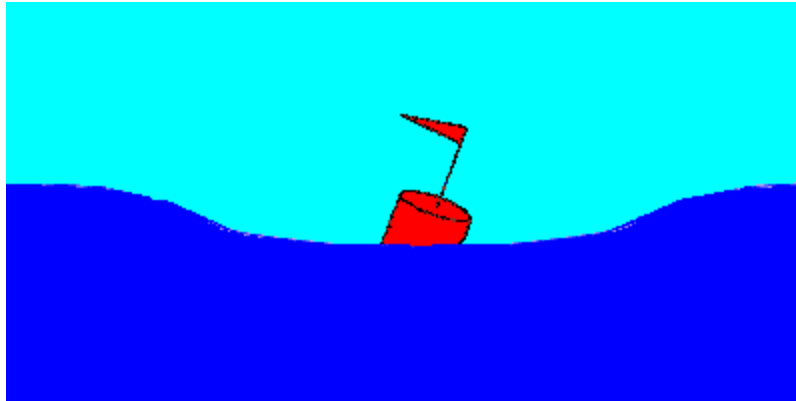
az energia nem folytonosan hanem adagokban (kvantum) terjed: $E = N \cdot \epsilon$, $\epsilon = h \cdot f$

Planck-állandó $h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Előadás vége

A következő ábrák tanulást segítőek, de a 45 percbe nem férnek bele.

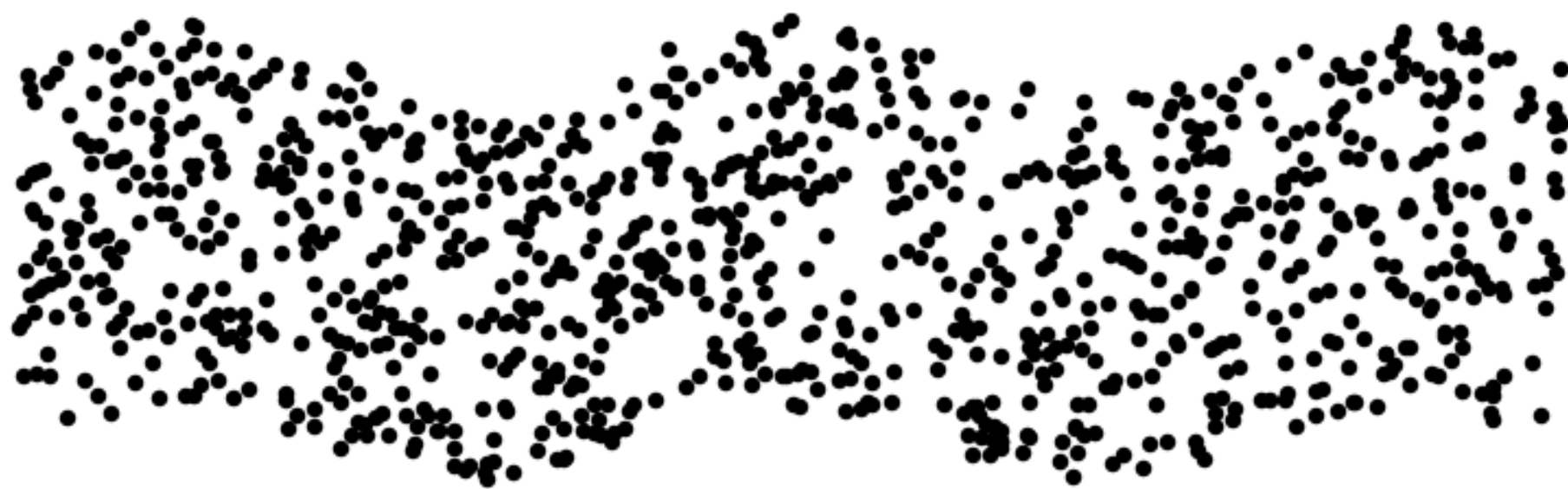
a hullámokat a hullámegyenlet írja le, mely megadja a részecskék mozgását a hely és idő függvényében



az egyes részecskék helyhez kötött periodikus mozgást végeznek, csak a „hullámfront” halad!

az egyes részecskék helyhez kötött periodikus mozgást végeznek, csak a „hullámfront” halad!

transzverzális hullám



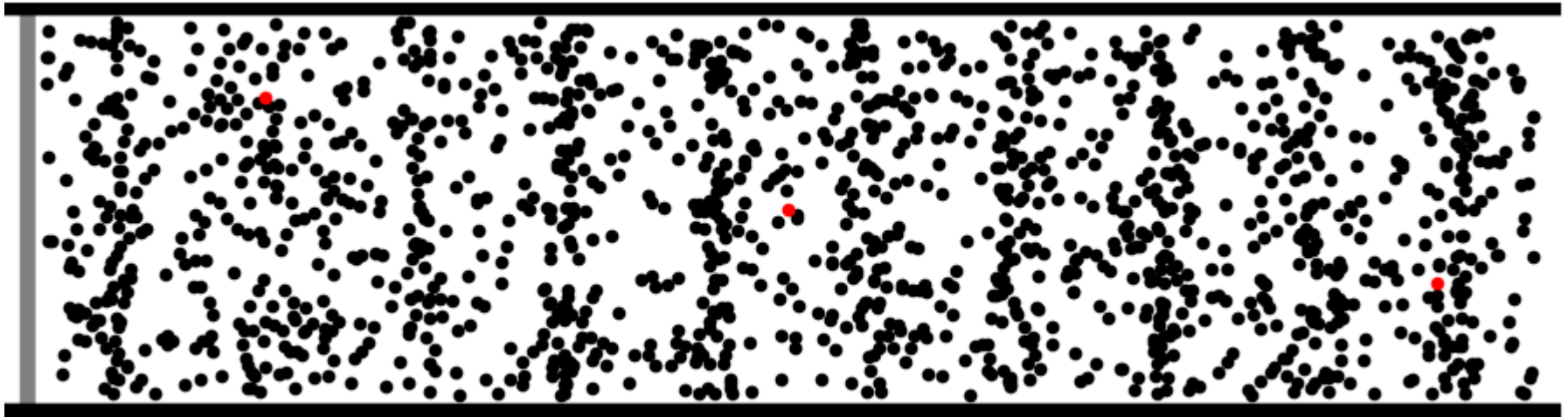
A hullámfront haladási iránya merőleges a részecskék mozgására



az egyes részecskék helyhez kötött periodikus mozgást végeznek, csak a „hullámfront” halad!

Longitudinális hullámok:

A hullámfront haladási iránya párhuzamos a részecskék mozgásával



©2011. Dan Russell



A hullám forrása (itt egy mozgó felszín)

a hullám haladása azt jelenti, hogy a részecskék mozgás-állapota terjed tova.



itt a mozgás-állapot például az egyes részek kimozdulásának mértéke.



A hullám-egyenlet egy kicsit komplikált alakú:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

valamely tulajdonság, pl kitérés értékének (itt “u”) időbeli (du/dt) és térbeli (du/dx) megváltozását vizsgáljuk, de a változás mértékének a változása is érdekes (d²u/d...²), ezeket pedig a terjedési sebesség (vagy fázissebesség) (itt “c”) köti össze.

A két változós u(x,t) függvényt keressük, amire a fenti igaz. A legegyszerűbb megoldás:

$$u(x,t) = A * \sin(k*x + \omega*t + \phi)$$

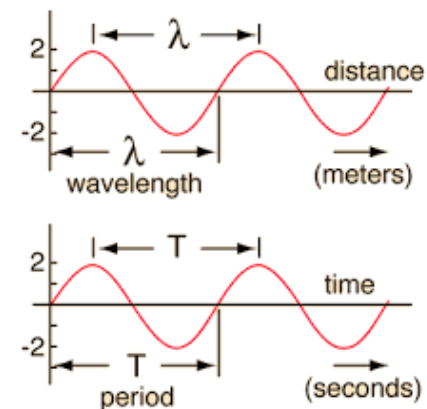
ahol

A az amplitúdó, k a hullámszám és ω a szögsebesség.

$\omega = 2\pi f$, és $f = 1/T$ [Hz], T a periódusidő.

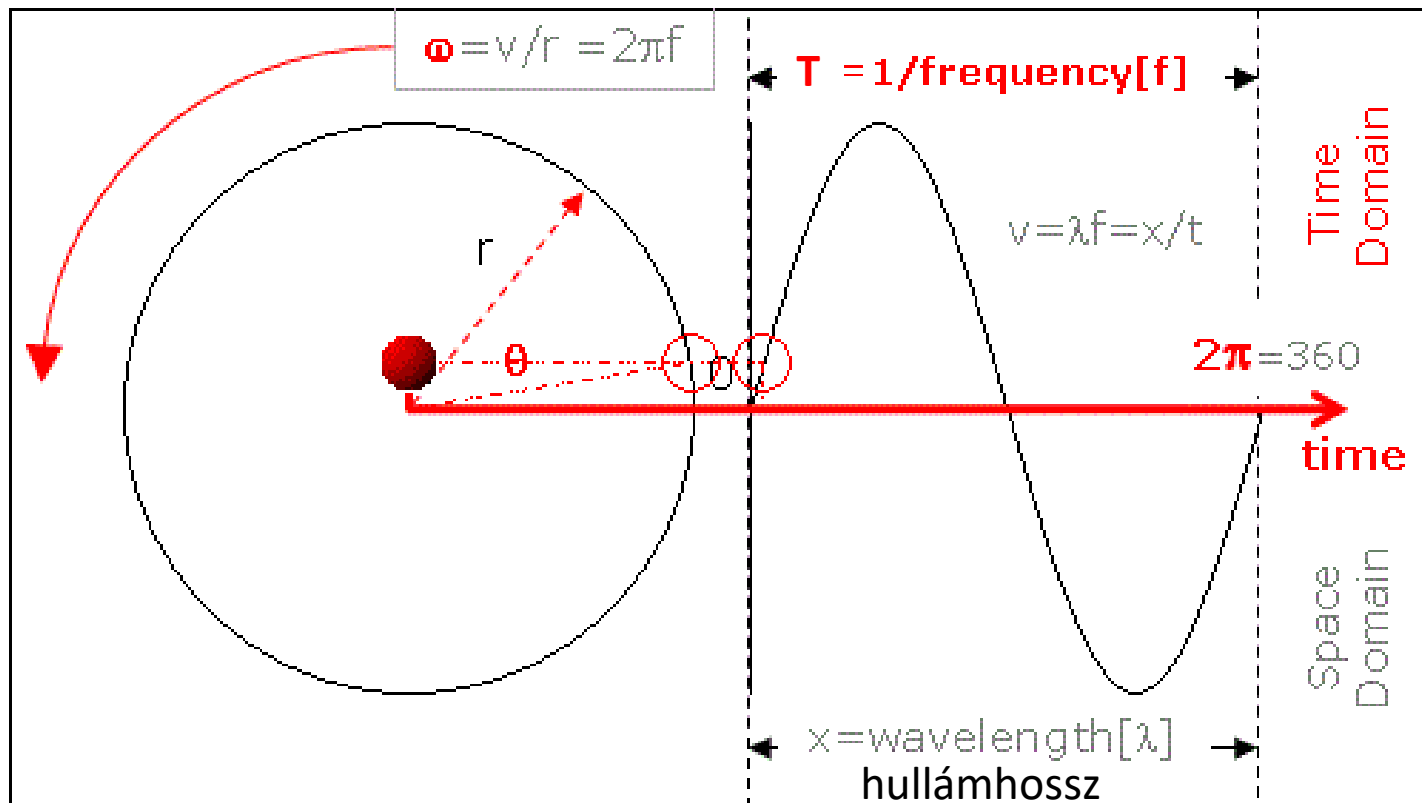
$\omega = c*k$ adja meg a hullámszámot, azaz $k = 2\pi/\lambda$.

ahol λ a hullámhossz.



a hullám „v” sebességgel terjed, így minden pont mozgása, kitérése a helyének és az időnek a függvénye.

A **harmonikus mozgás** a legtöbbet használt eset:



Hullámfajták

- Keletkezés **mechanizmusa** szerint:

1. Mechanikai: rugalmas deformáció, rugalmas közegben terjed (pl. hang)
2. Elektromágneses: elektromos zavar, vákuumban (is) terjed (pl. fény)

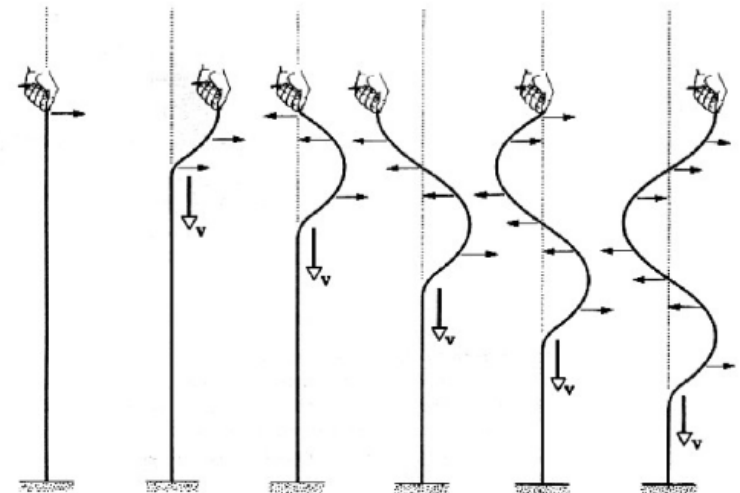
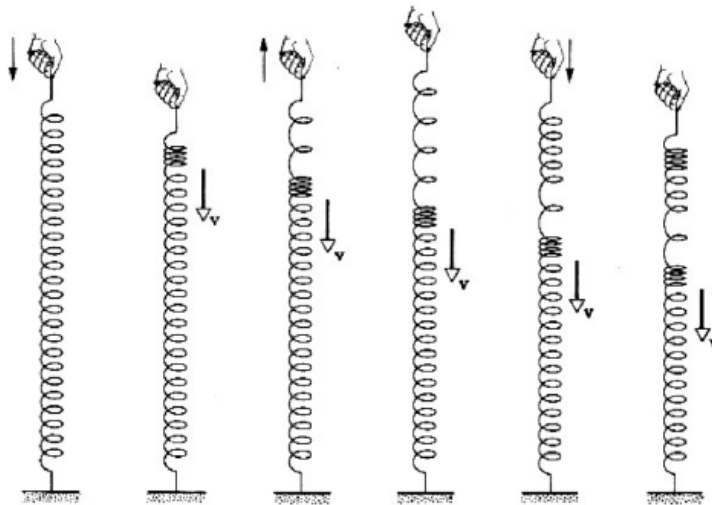
- Terjedés **dimenziója** szerint:

1. egydimenziós (pl. megpendített húr)
2. felületi hullámok (pl. síkhullám vízfelületen)
3. térbeli hullámok (pl. hang)



- A rezgés és terjedés relatív **irányai** szerint:

1. Longitudinális (pl. hang)
2. Transzverzális (pl. fény)



Az elektroomágneses hullámokat ezért két egyenlet adja meg:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - c_0^2 \cdot \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

itt a ∇ a változás változását jelenti $d^2/d...^2$ 3 dimenzióban

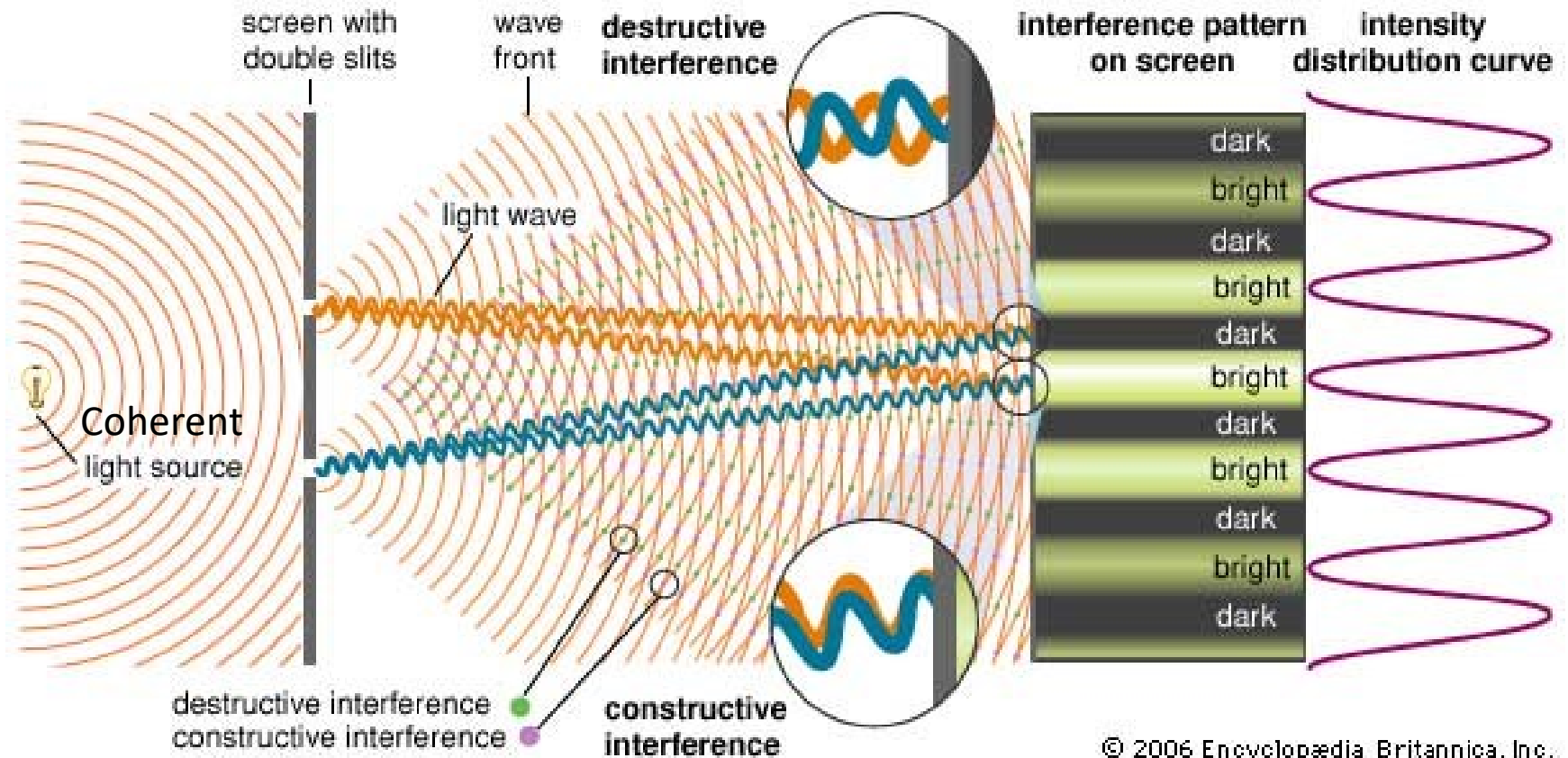
$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - c_0^2 \cdot \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

a megoldás megint trigonometrikus, DE most \mathbf{x}, \mathbf{k} vektor benne:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)$$

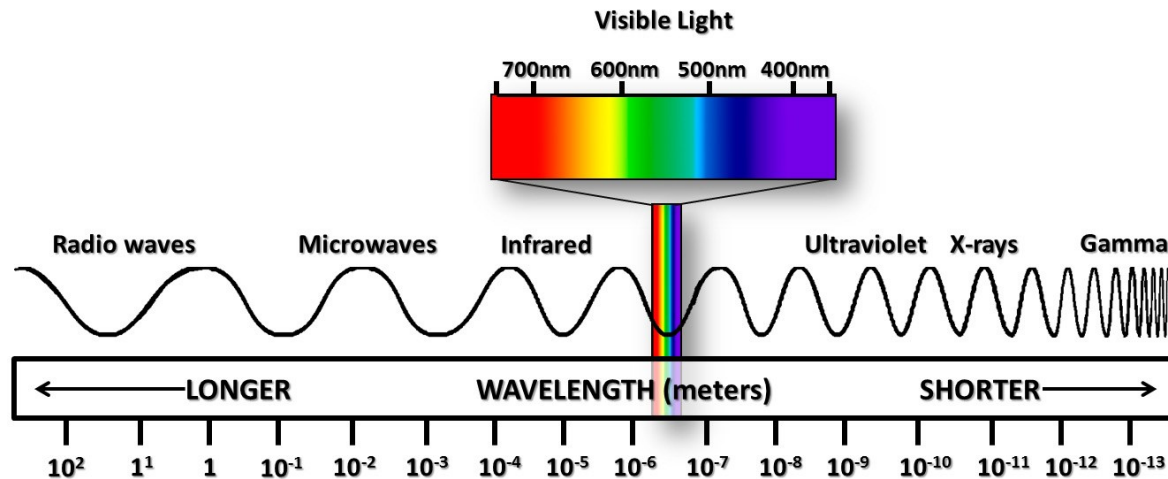
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)$$

A Huygens-Fresnel elv és az interferencia megmagyarázza a Young-féle kísérletet!



Alkalmazás

az optikai rácscsal a fényt frekvenciák (hullámhossz) szerint fel lehet bontani



The Electromagnetic Spectrum

Wavelength in meters



About the size of:



Ezt egy objektív mikrométerrel és zárható réssel ellátott mikroszkóppal be is lehet mutatni

detailed image of the
optical grating
(many higher order maxima)

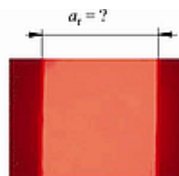
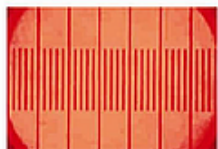


image of the
"red" slit



blurred image
of the optical grating
(limiting case,
10 μm lines are
just not visible)

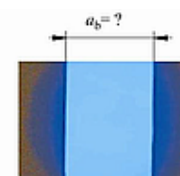
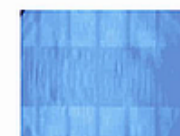
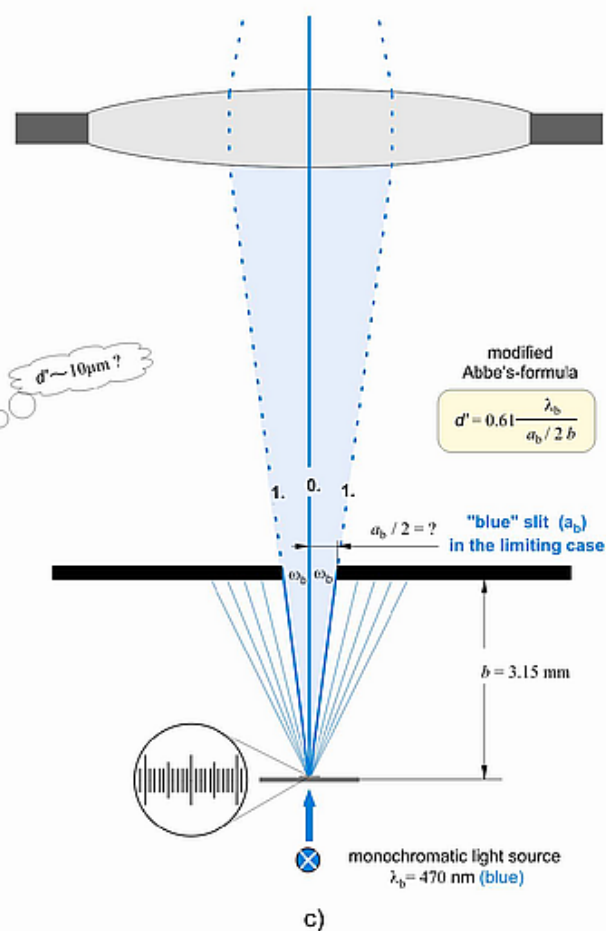
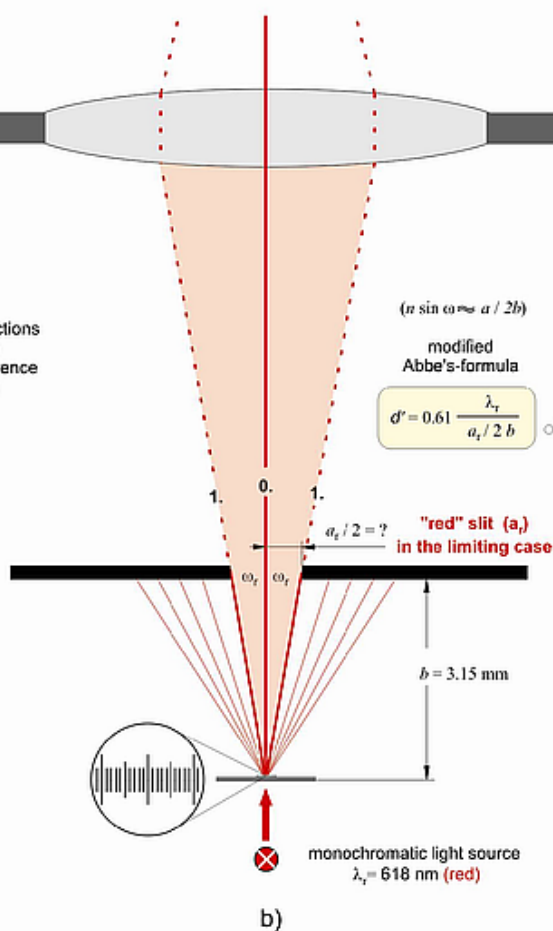
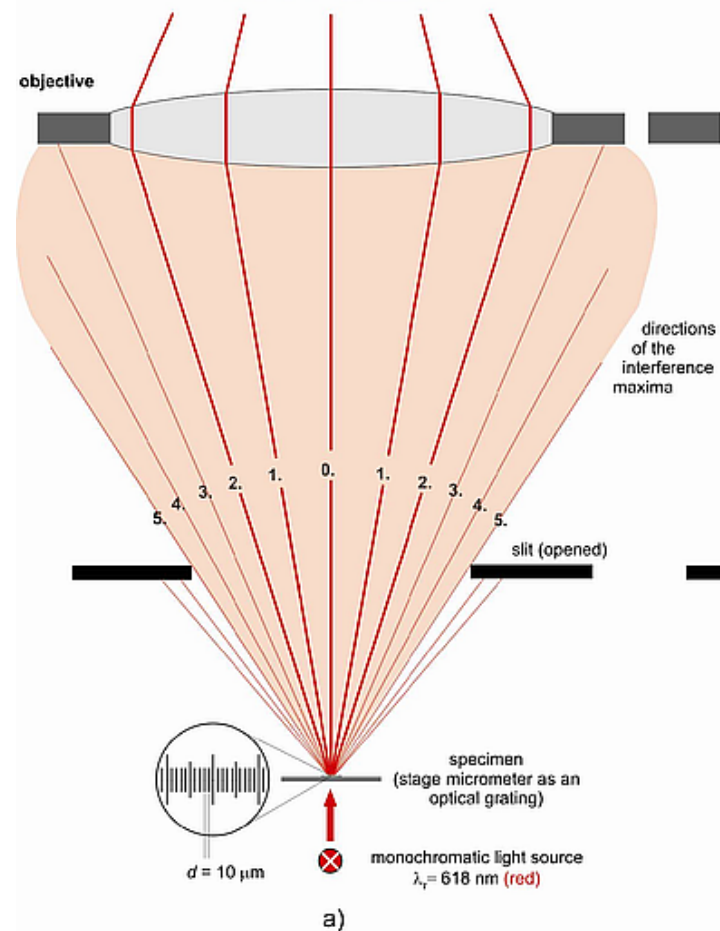
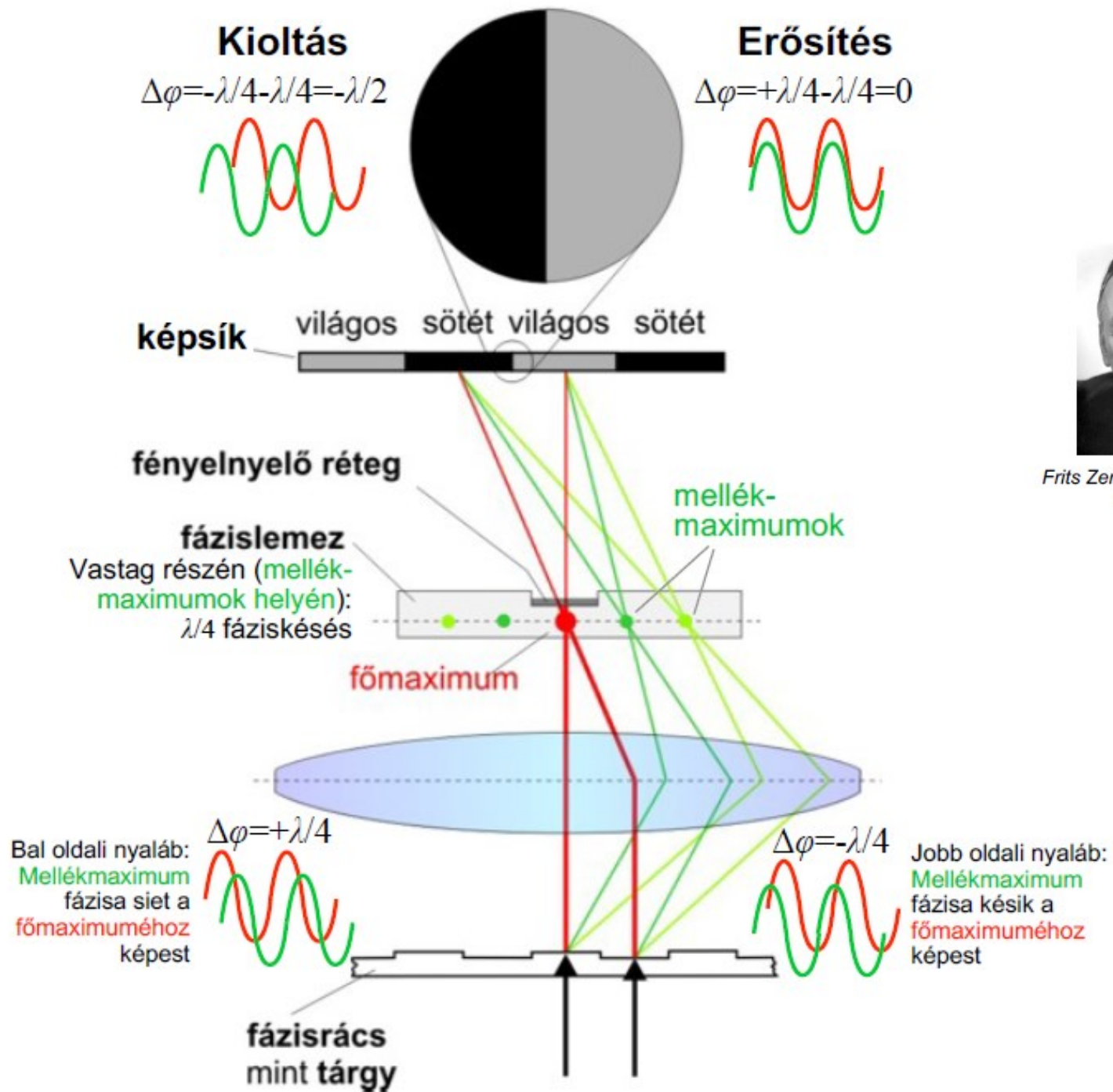


image of the
"blue" slit



blurred image
of the optical grating
(limiting case,
10 μm lines are
just not visible)





Frits Zernike (1888-1966)
 Nobel-díj