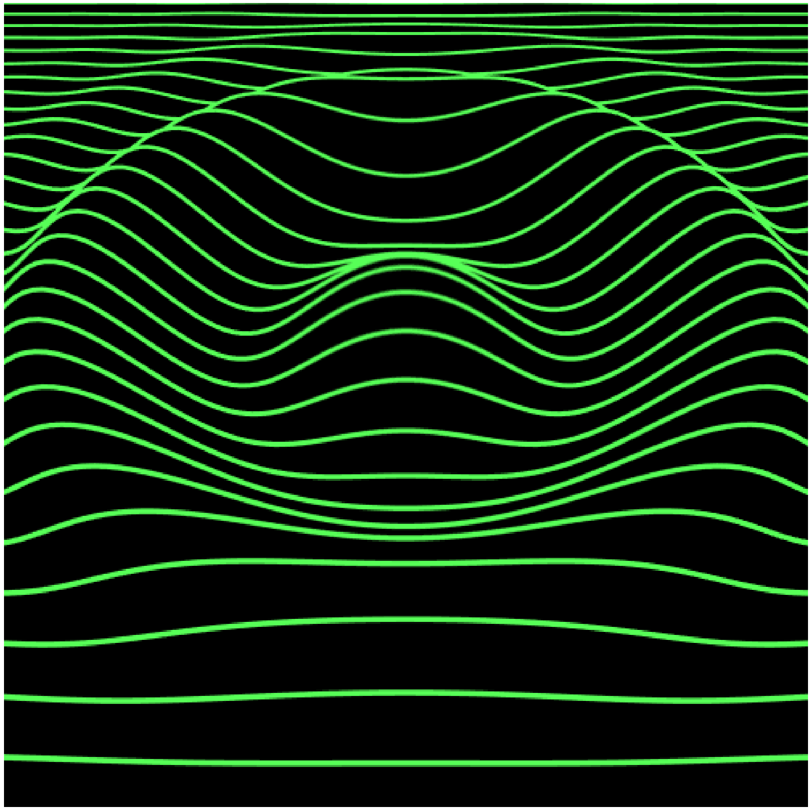
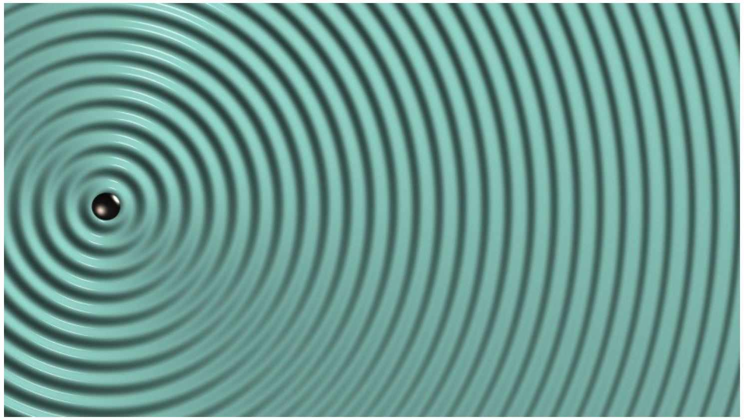
Hullámoptika

nem csak optikában vannak hullámok…

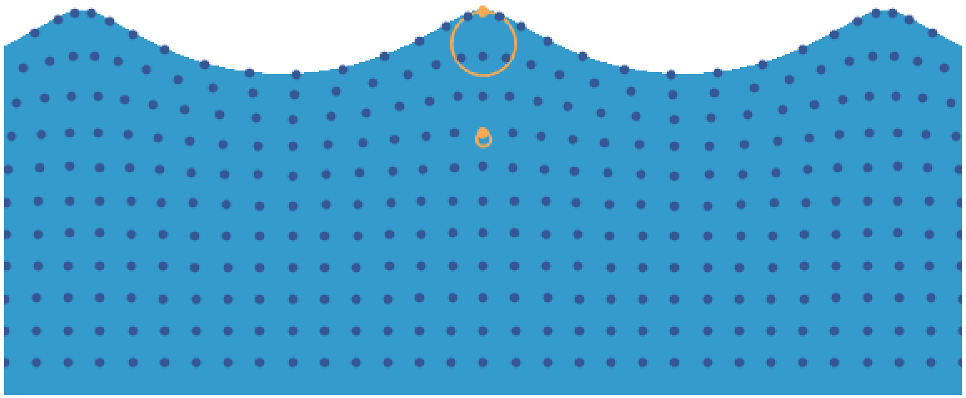




G.Schay

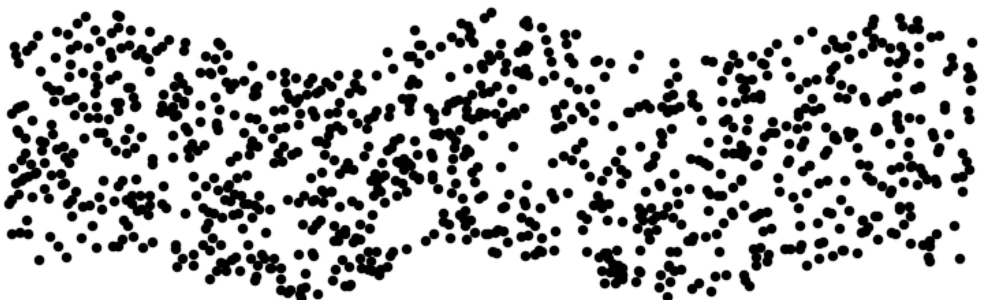
az egyes részecskék helyhez kötött periodikus mozgást végeznek, csak a „hullámfront” halad!

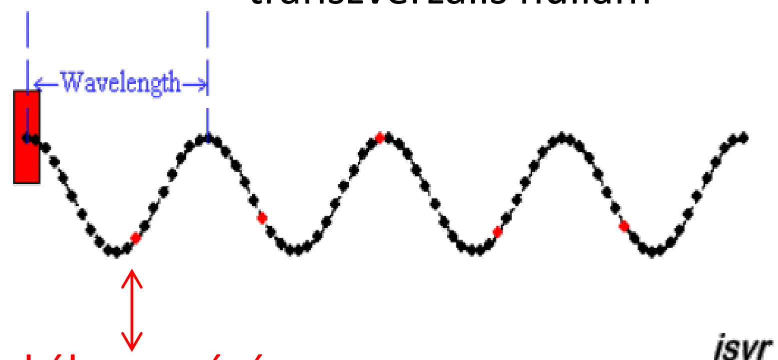
Vízfelszíni hullámok



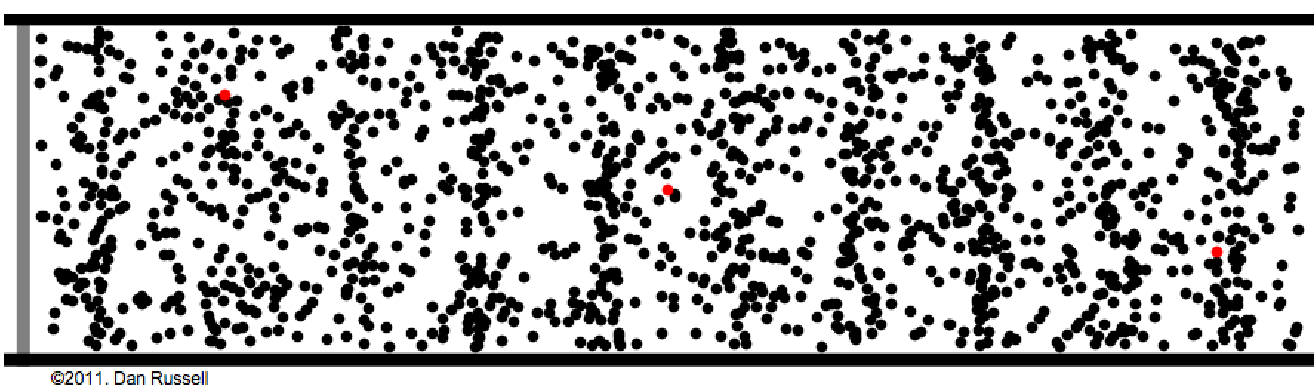
a hullám haladása azt jelenti, hogy a részecskék mozgás-állapota terjed tova.

transzverzális hullám





A hullámfront haladási iránya **merőleges** a részecskék mozgására



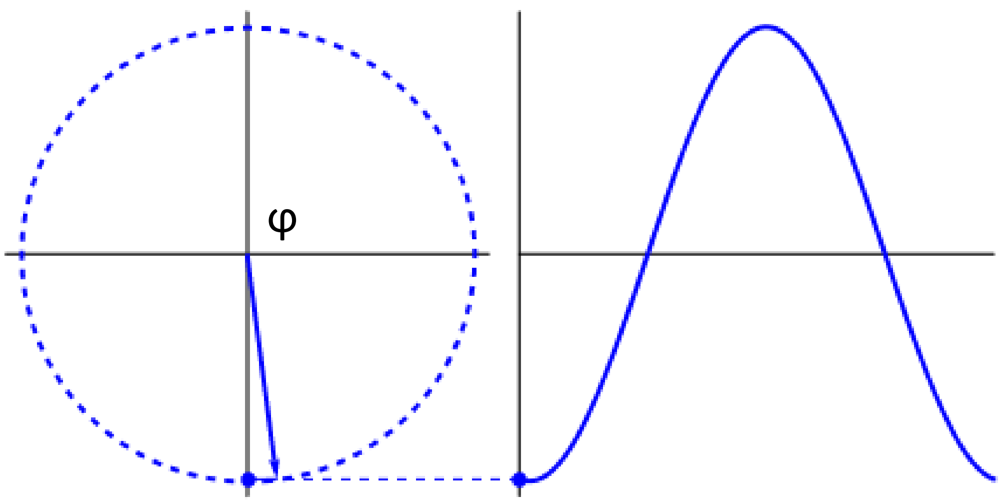
Longitudinális hullámok:
A hullámfront haladási iránya **párhuzamos** a részecskék mozgásával

$y(x,t) = A * \sin(k*x + \omega*t + \phi)$
ahol y a kitérés,
A az amplitúdó, k a hullámszám és ω a szögsebesség.

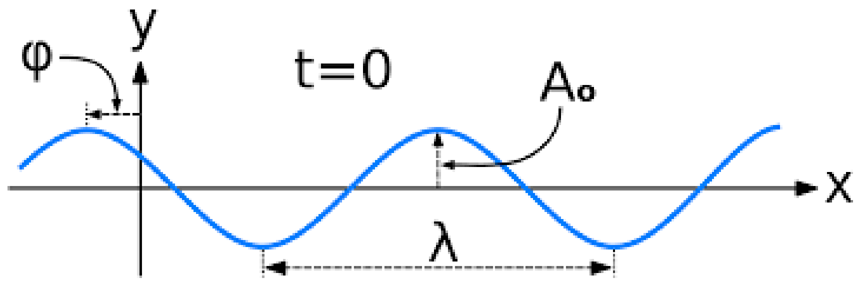
$\omega = 2\pi f$, és $f = 1/T$ [Hz], T a periódusidő.
$\omega = c*k$ adja meg a hullámszámot, azaz $k = 2\pi/\lambda$.
ahol λ a hullámhossz.

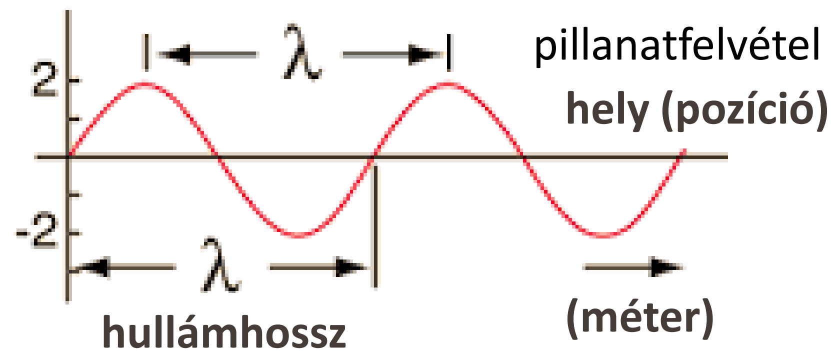
$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

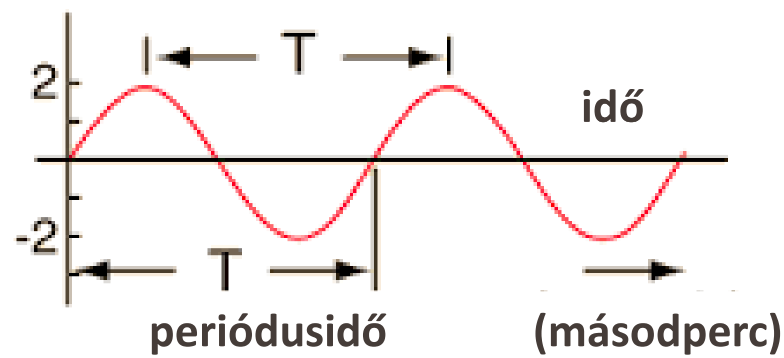
a sin-os hullám egy kör mentén való forgással
is leírható (szögsebesség, egy teljes kör 2π).
itt a ***fázis*** a pillanatnyi állapot a kör mentén: φ



grafikusan

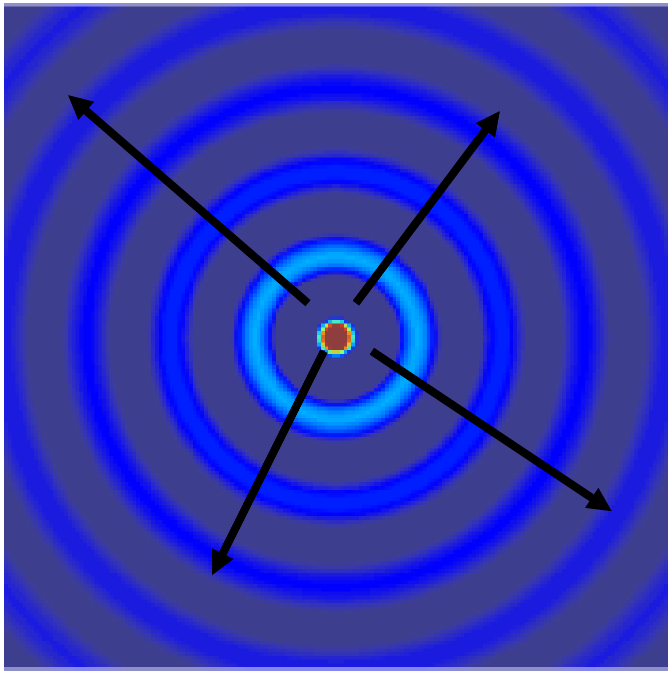




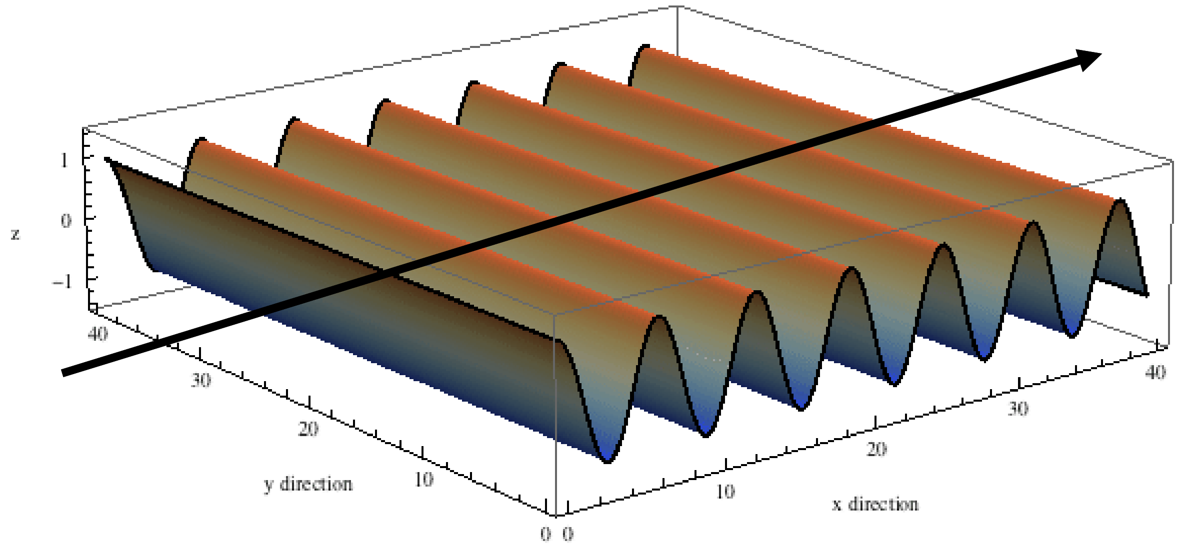


egy adott pontban az időbeli változás

pontszerű hullámforrás, homogén közegben
(tehát mindenfele egyformán terjed)



kör- vagy gömbhullám

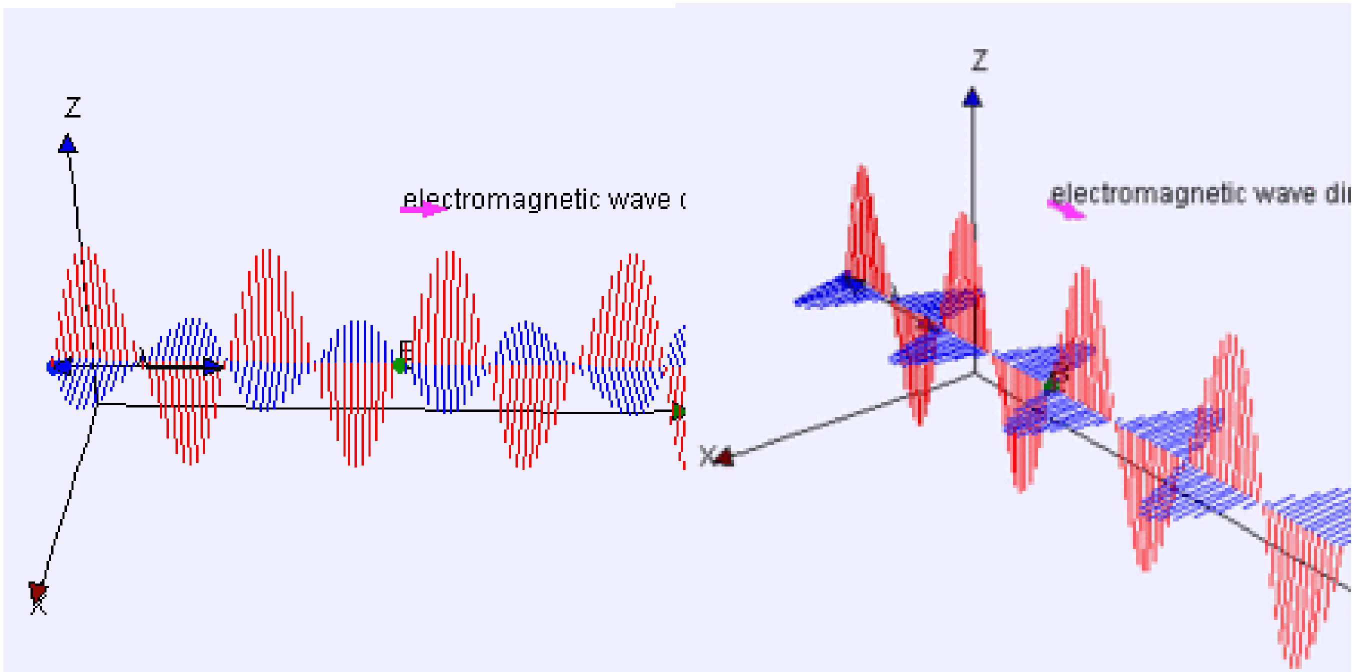


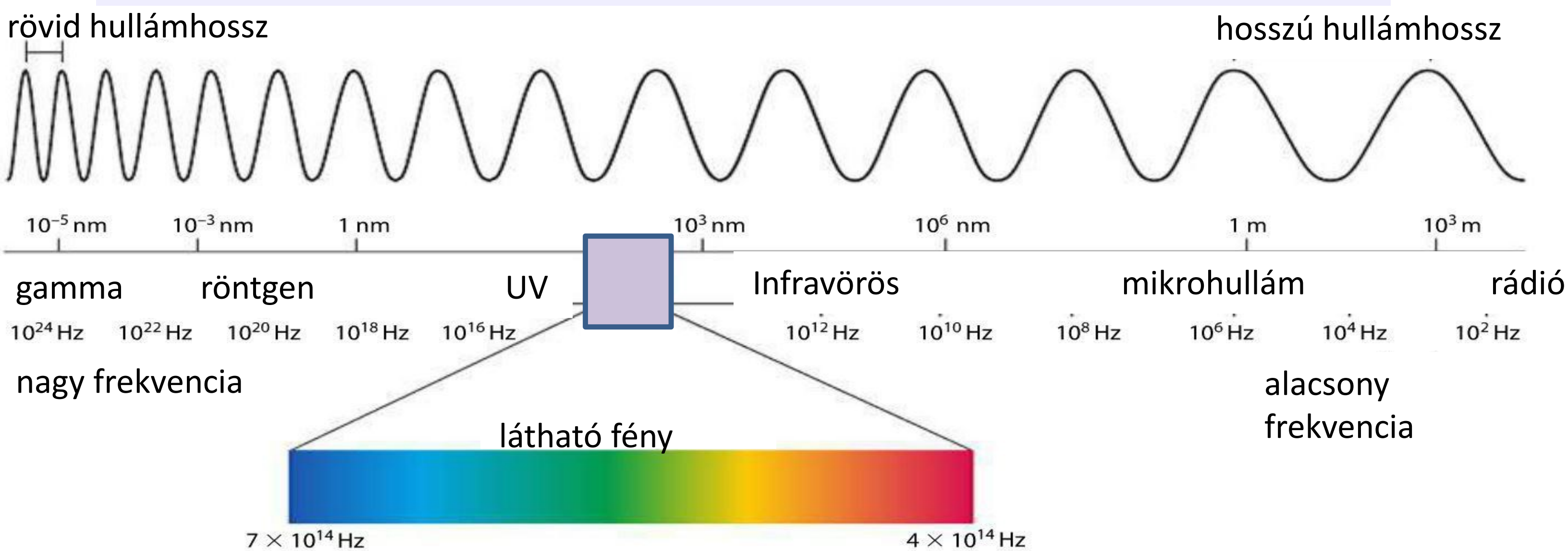
síkhullám

terjedési irány
"fénysugár" a geometriai optikában

A fény elektro-mágneses hullám

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

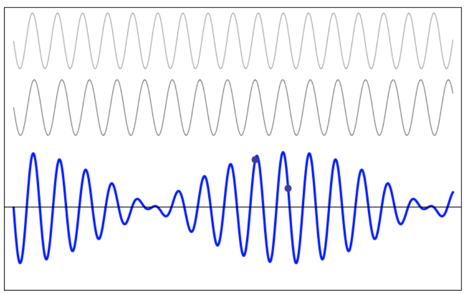


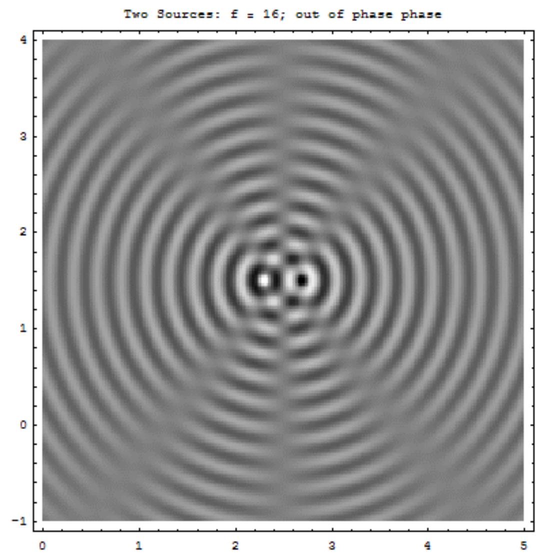


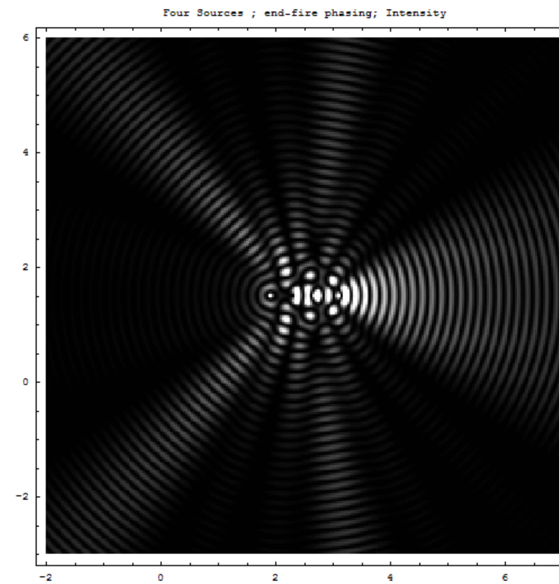
Hullámok szuperpozíciója: a „kitérés”ek amiket az egyes hullámok okoznak összeadódnak.

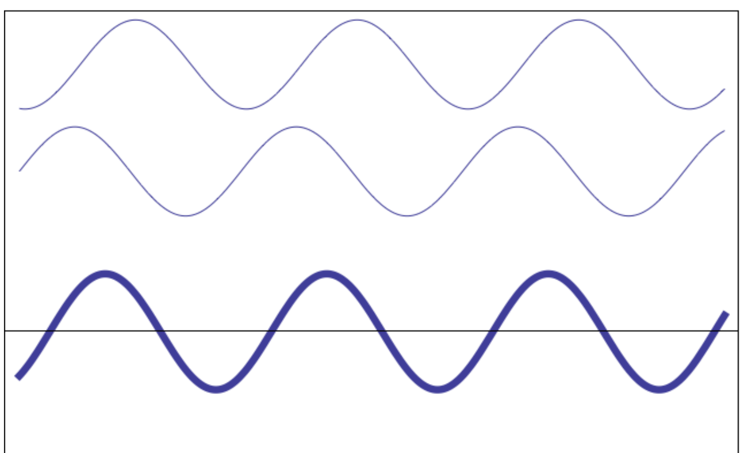
$$y(x,t) = A_1 * \sin(k_1 * x + \omega_1 * t + \phi_1) + A_2 * \sin(k_2 * x + \omega_2 * t + \phi_2) + \dots$$

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





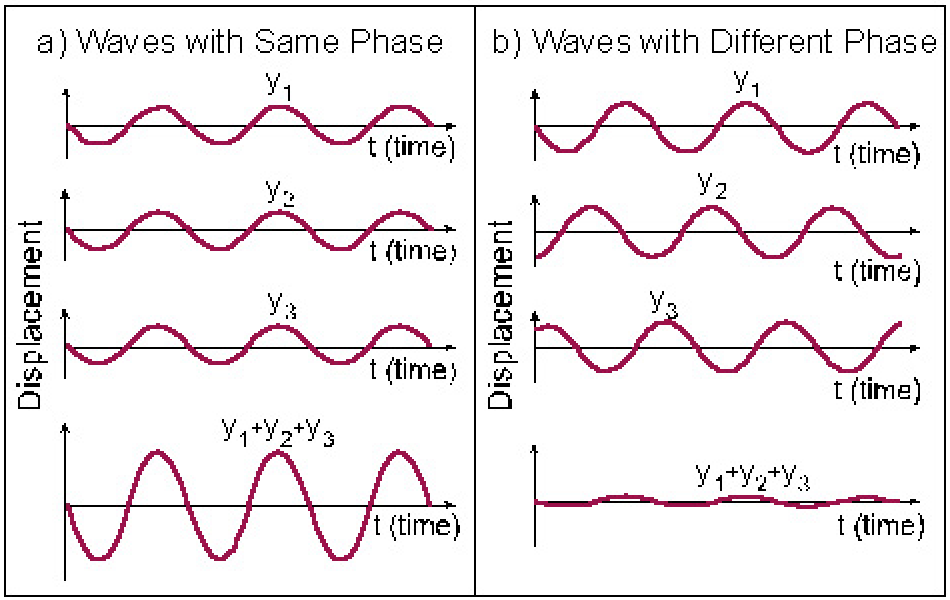


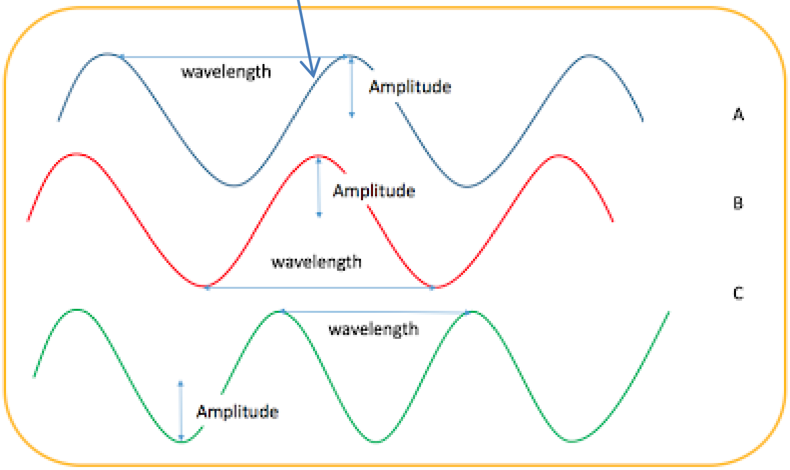


https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/superposition/superposition.html

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

koherens hullámok ki tudnak alakítani időben stabil mintázatot

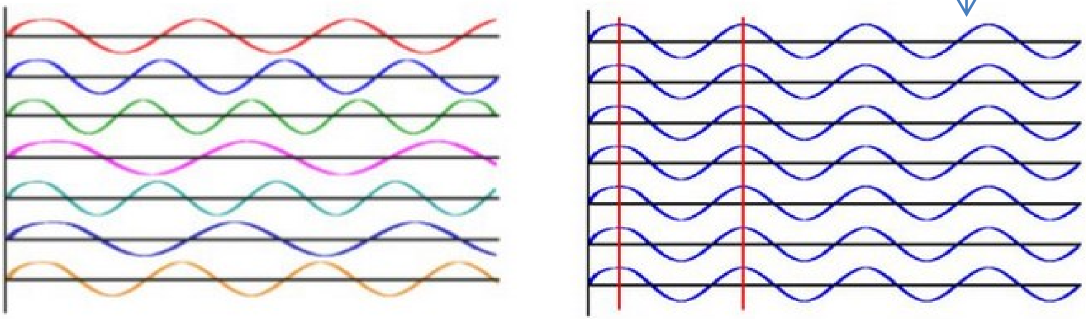




ha a fázis eltérés 0 (vagy 1,2,3.. $*2\pi$), konstruktív interferencia lép fel.

Konstruktív interferencia:
„maximum – maximummal”

Destruktív:
ellentétes fázisban találkoznak

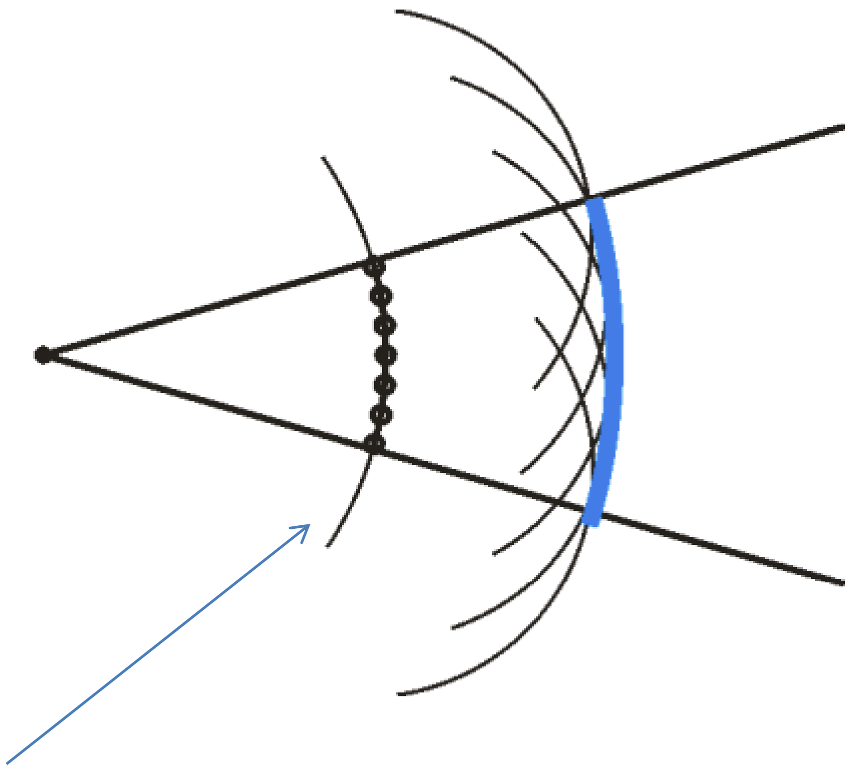


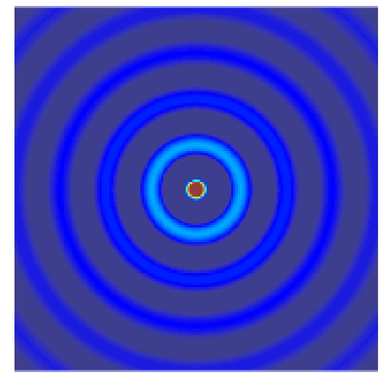
Incoherent light waves

Coherent light waves

A Huygens-Fresnel elv

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





Christiaan **Huygens**
(1629-1695)

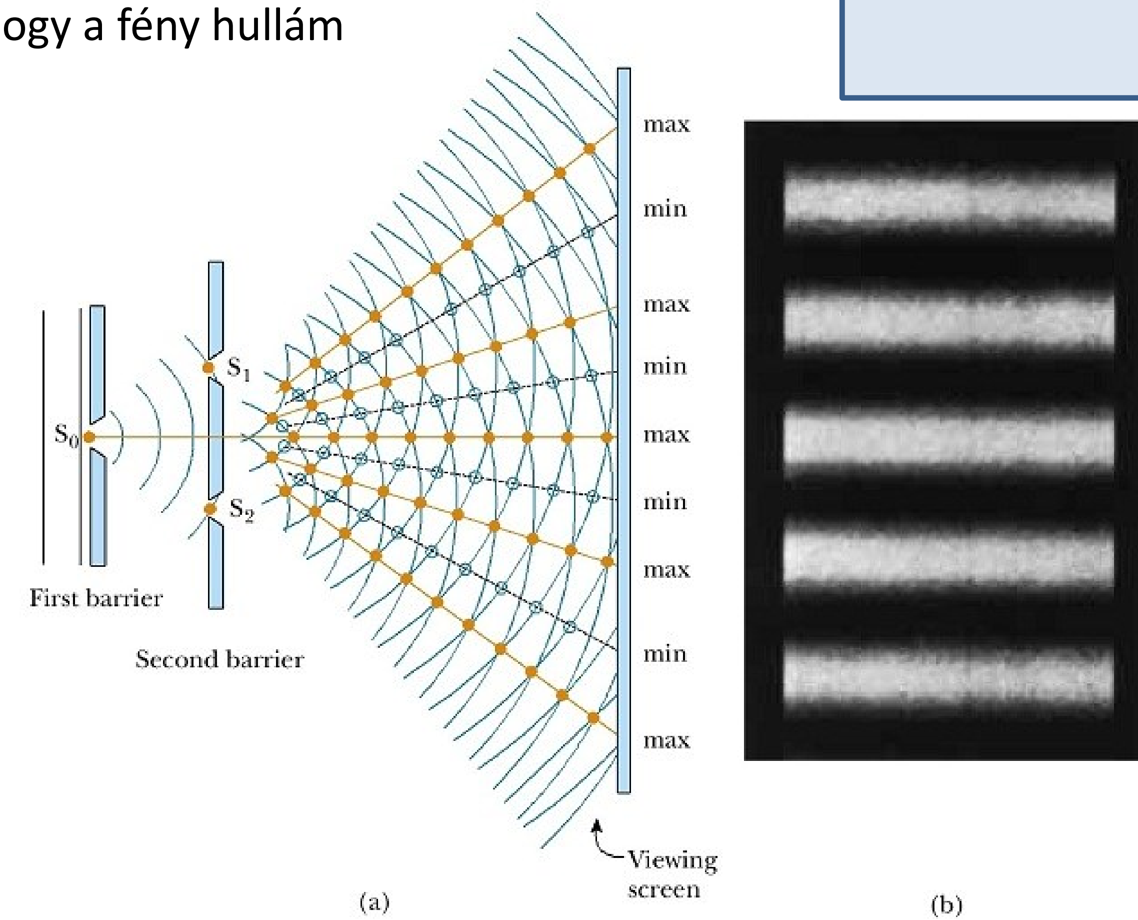
Augustin-Jean **Fresnel**
(1788–1827)

hullámfront: azonos fázisú pontok halmaza (pl a maximumok)

Kísérletek amiket csak a hullámtan magyaráz meg

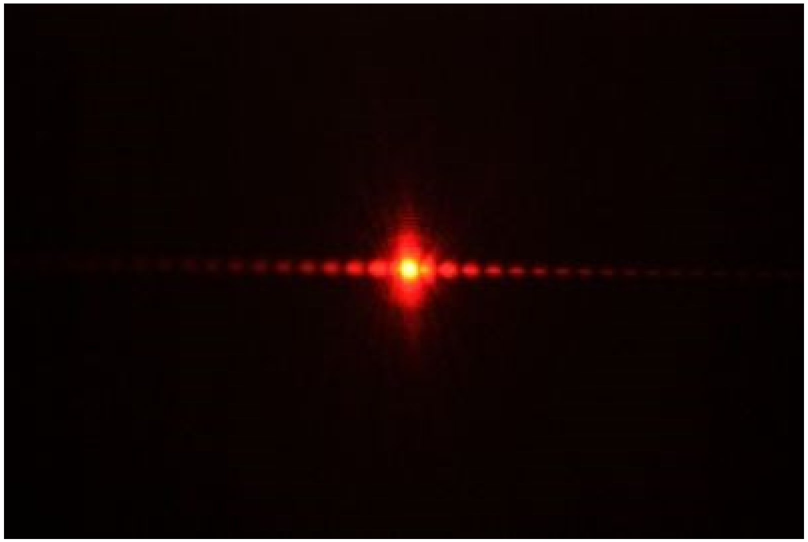
Young-féle két-réses kísérlet

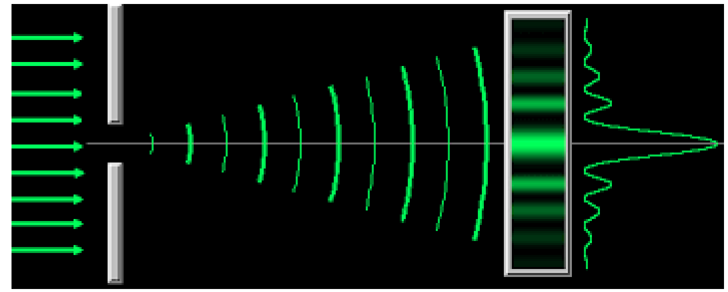
ez bizonyítja hogy a fény hullám

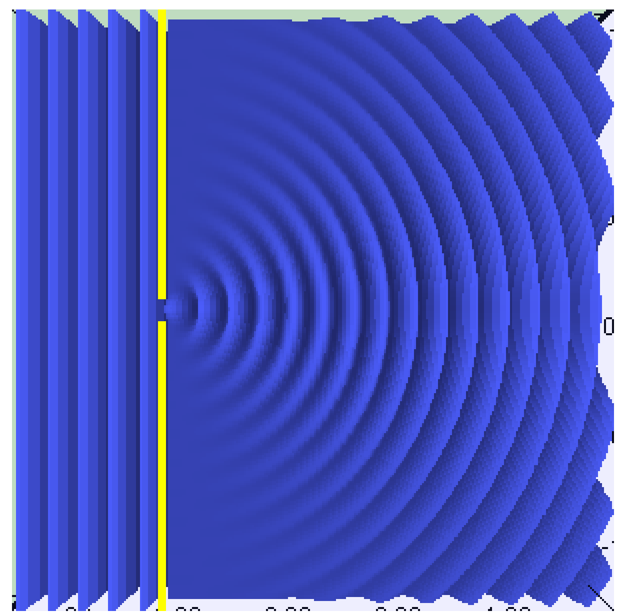


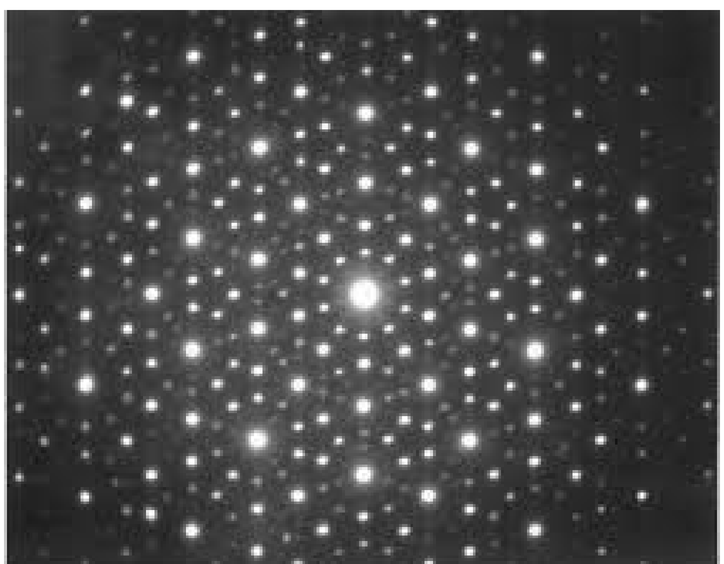
Thomas Young

Diffrakciós mintázatok koherens fénnyel. (lézerekkel lehet jól látni)

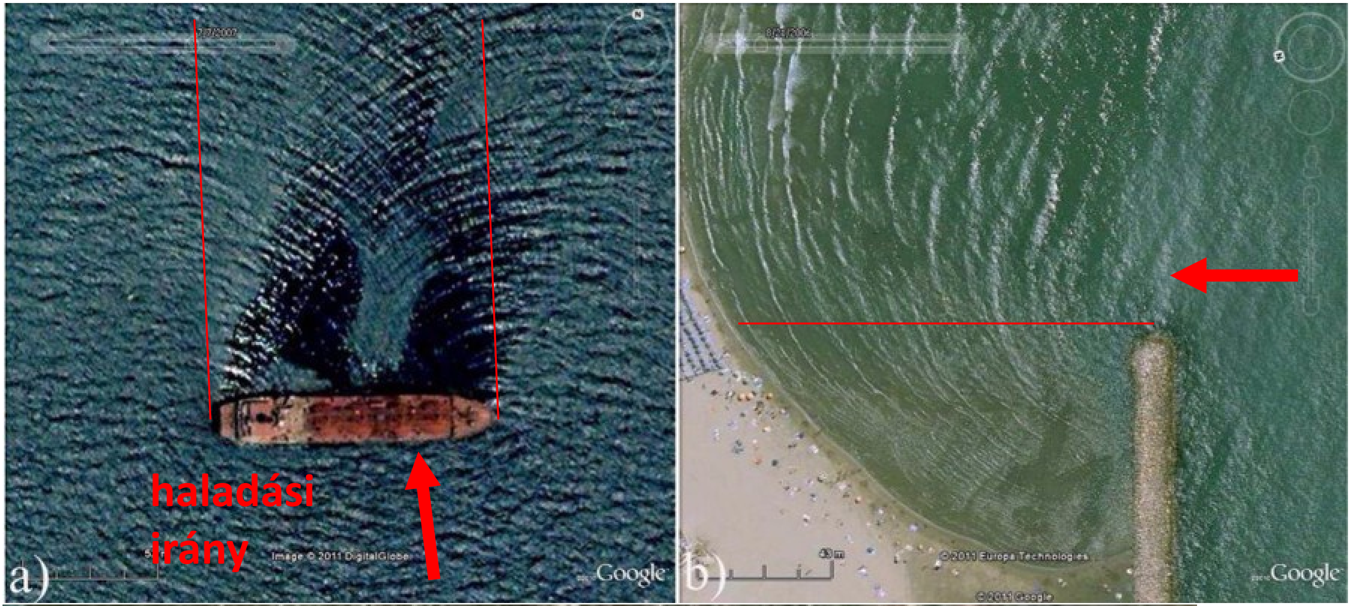


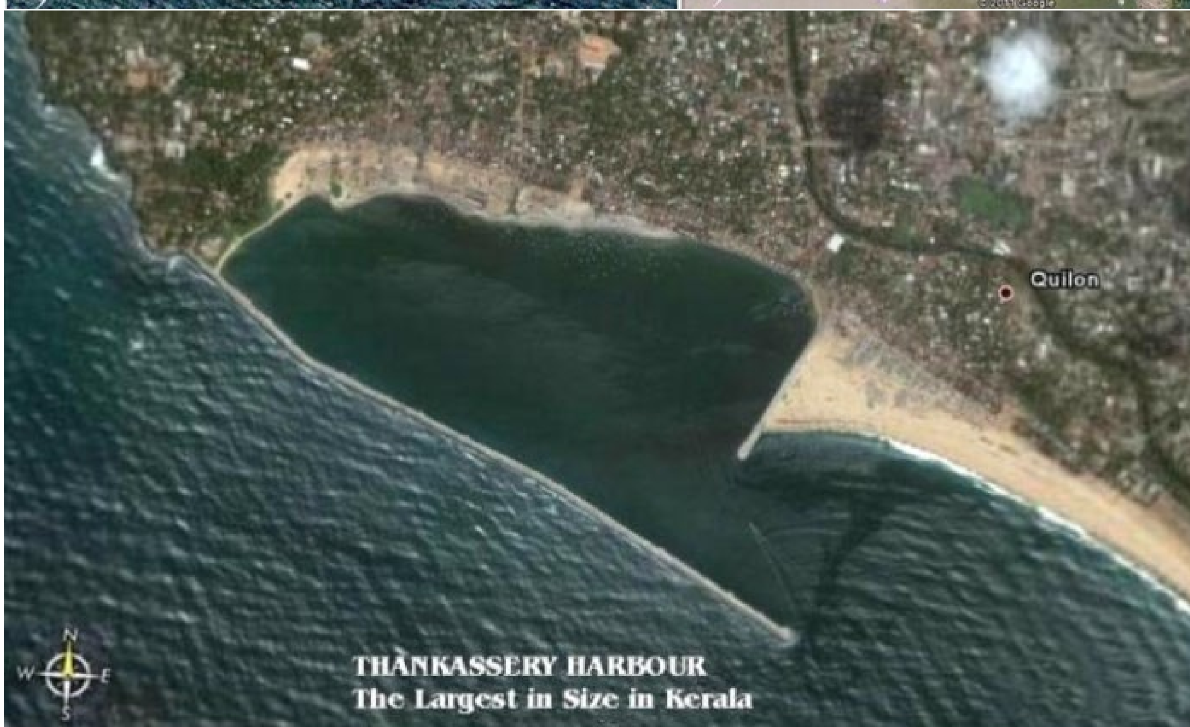






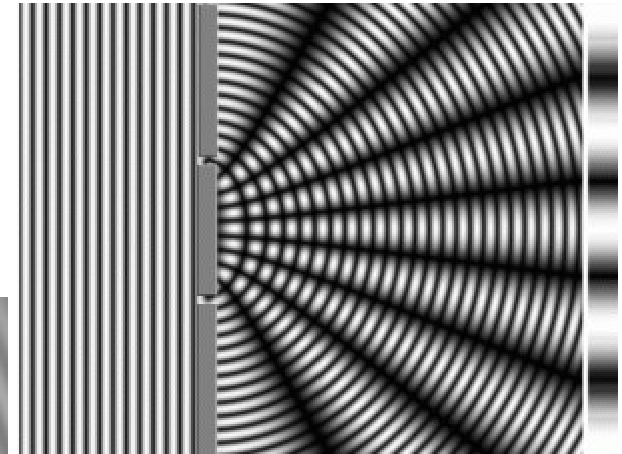
rtg diffrakció

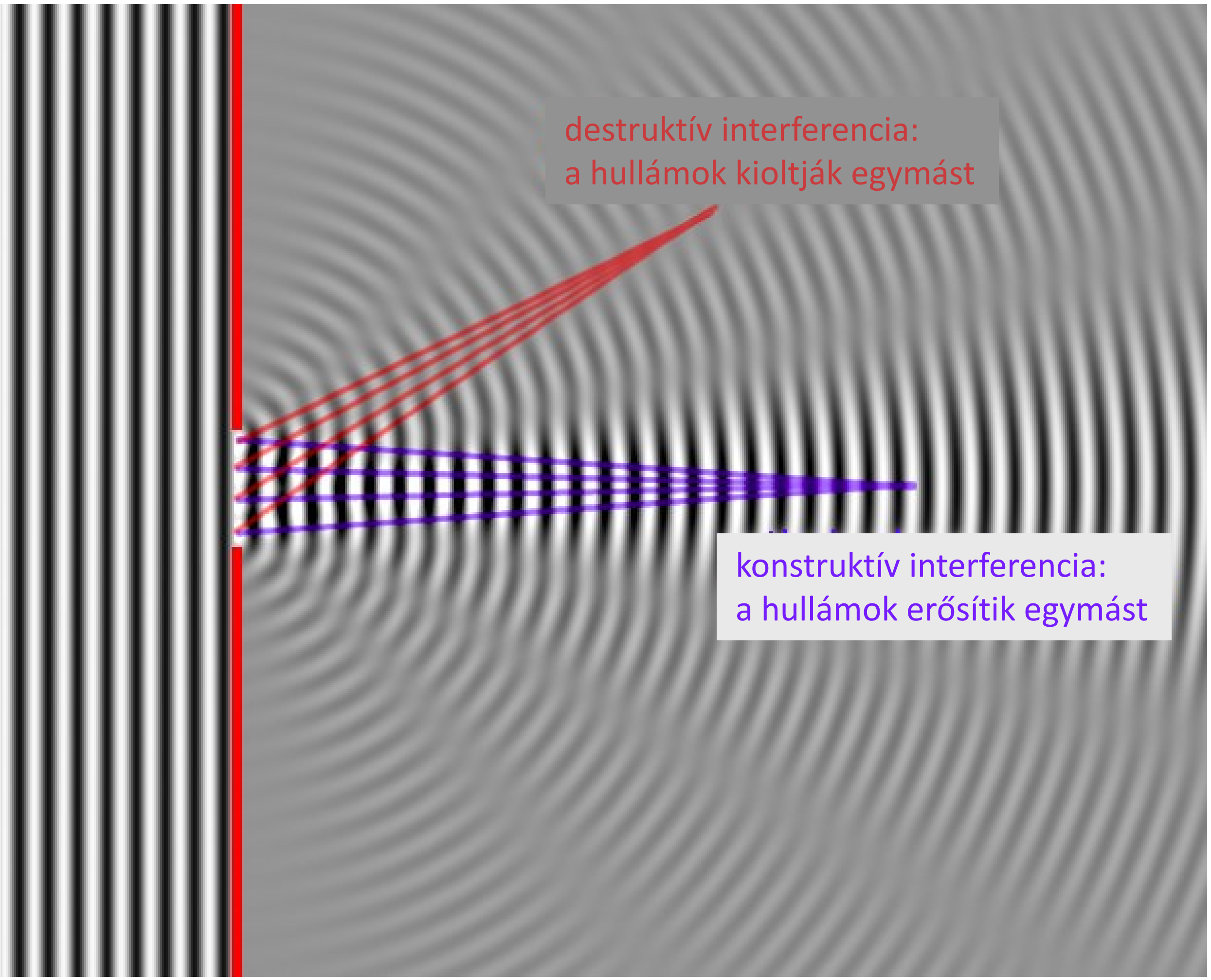


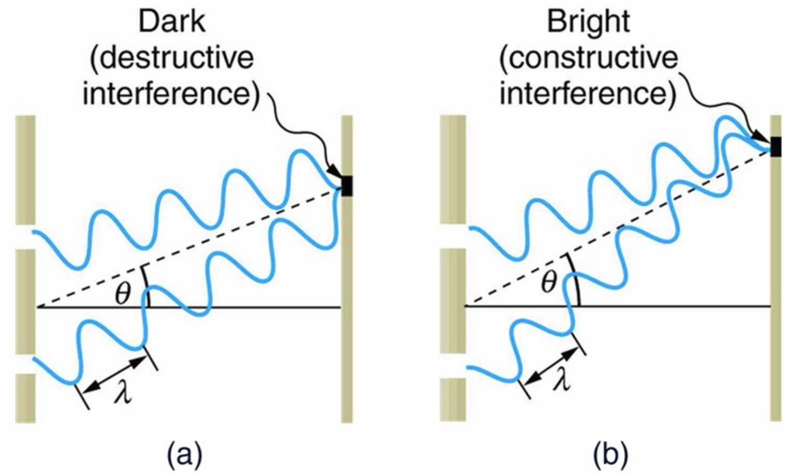


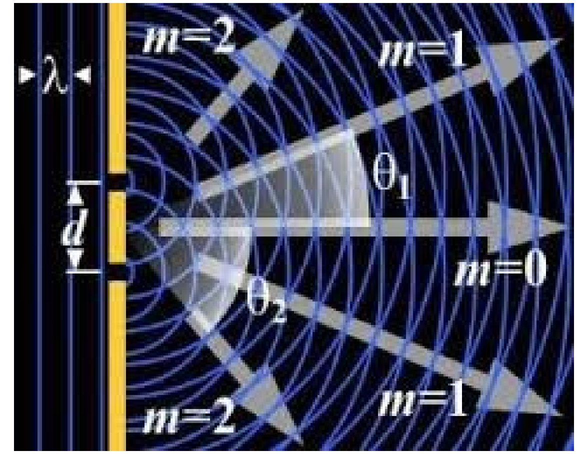
Diffrakció a vízen is előfordul…

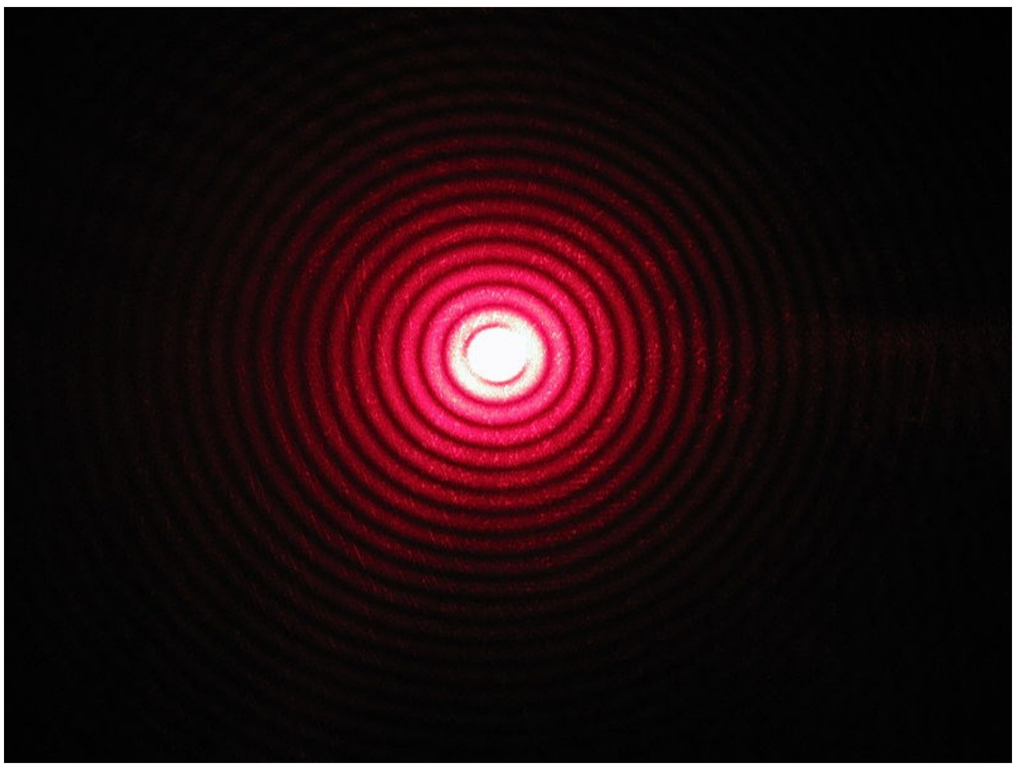
A mintázatok úgy alakulnak ki, hogy az összegzéskor időben állandóan egy-egy helyen kioltás vagy erősítés következik be.

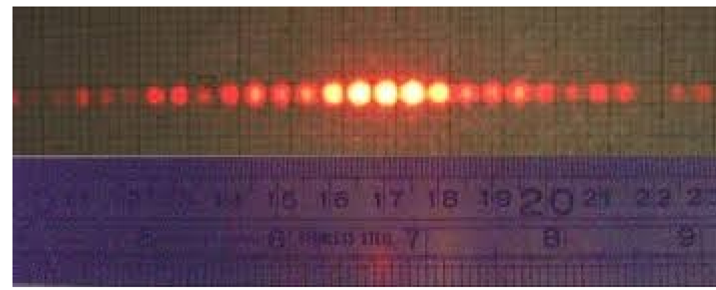




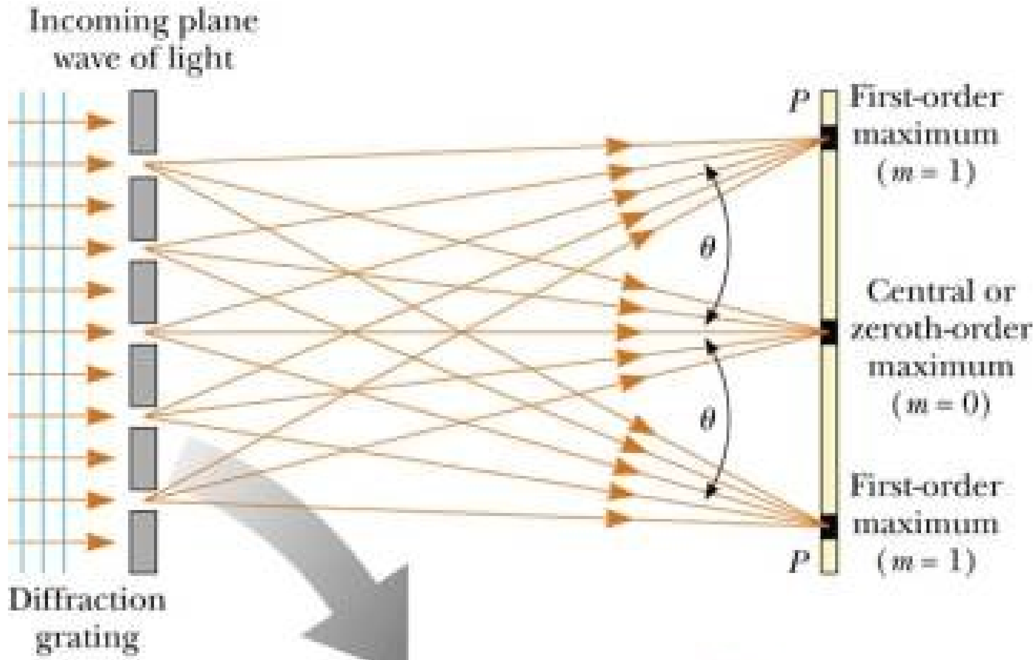

Dark
(destructive
interference)
Bright
(constructive
interference)
θ
λ
θ
λ
(a)
(b)


m=2
m=1
λ
θ1
d
m=0
θ2
m=2
m=1

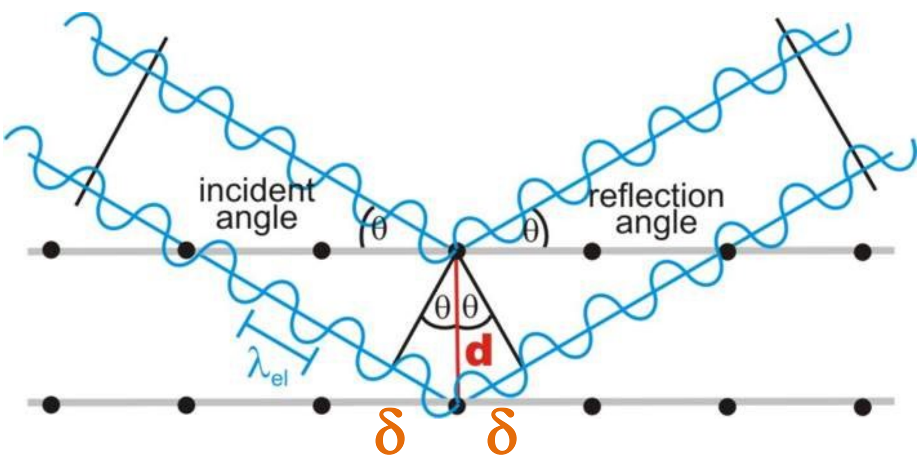


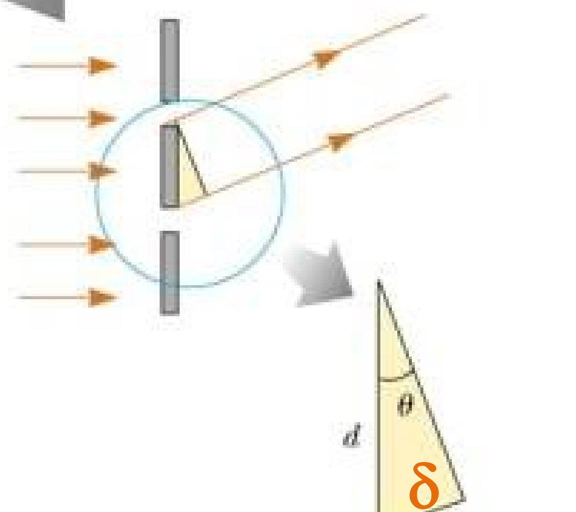


Elhajlás optikai rácson:



A reflexiós rácson az útkülönbség kétszer jelenik meg, így 2δ=λ (vagy egész számú többszöröse)



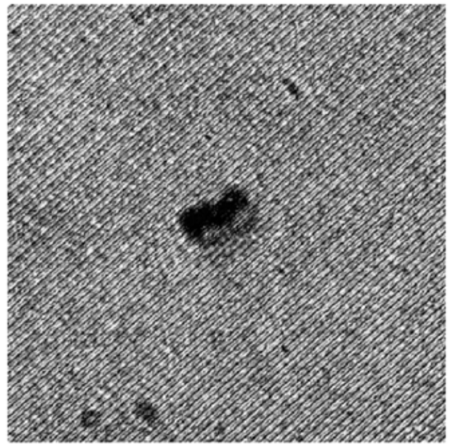


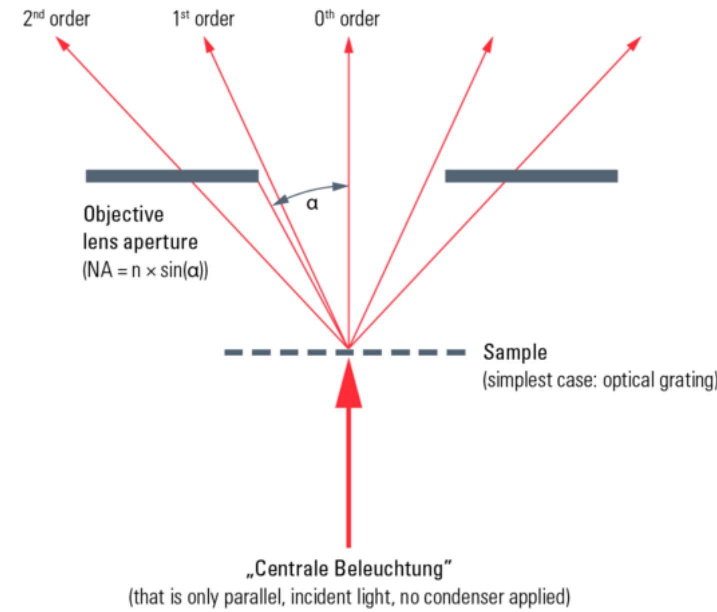
Konstruktív interferencia akkor alakul ki ha a fáziseltérés 0,1,2,3,… * 2π. Tehát δ –nak 0,1,2,3,… * λ nagyságúnak kell lennie.

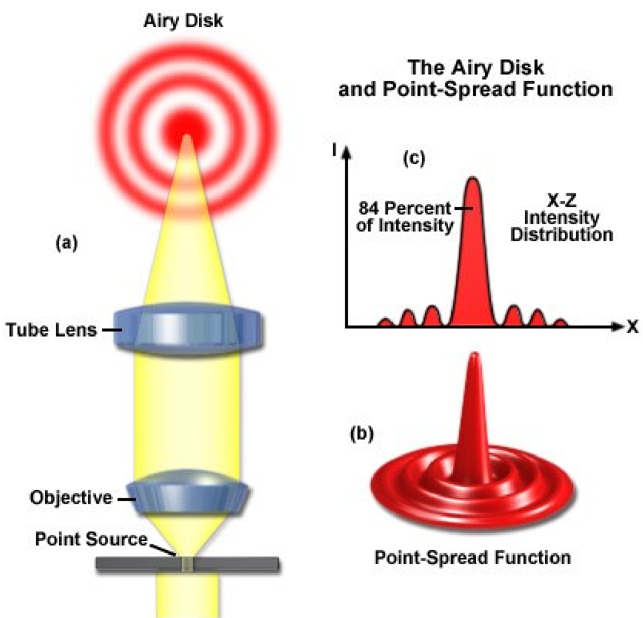
A fénymikroszkóp felbontóképessége a hullám-elhajlás miatt korlátozott

Abbe elv

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





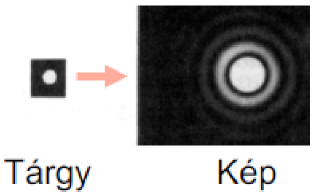


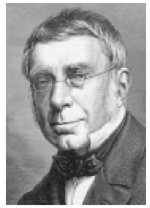
$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$

Ernst Abbe
(1840-1905)

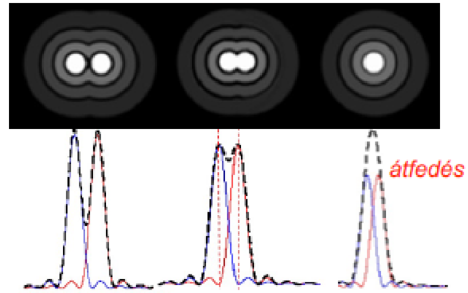
modern verzióban: $\delta = 0.61 \dfrac{\lambda}{n \sin \omega}$

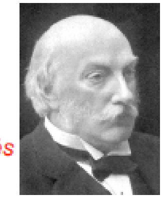
Diffrakció miatt: pontszerű tárgy képe elhajlási korong (Airy korong)




Sir George Biddel Airy (1801-1892)

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




Lord Rayleigh (1842-1919)

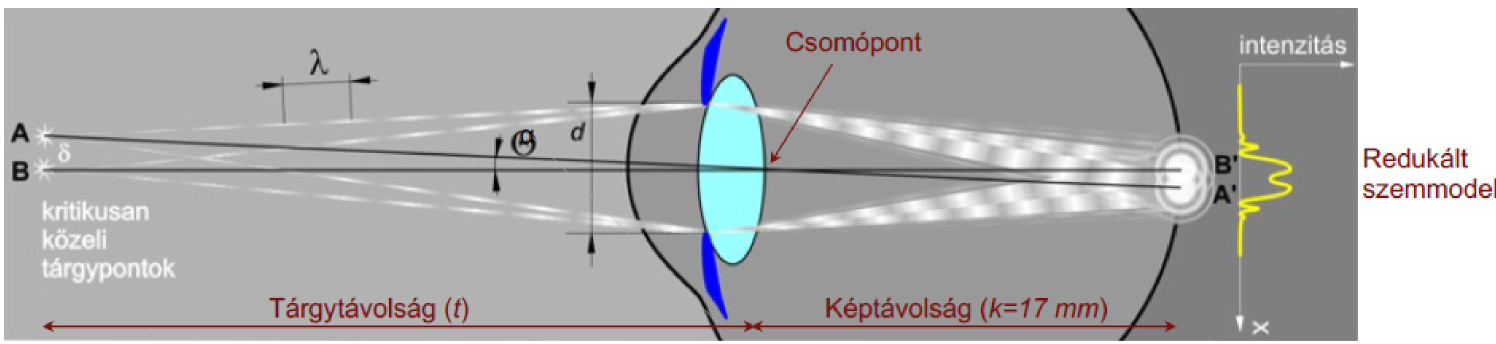
Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-képlet):

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

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


Ernst Abbe (1840-1905)

Az emberi szem hullámoptikai feloldóképessége:

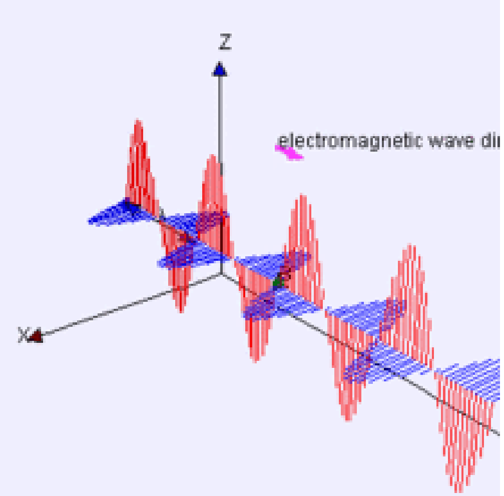


Látószöghatár: $\alpha_H = 1.22\frac{\lambda}{d}$

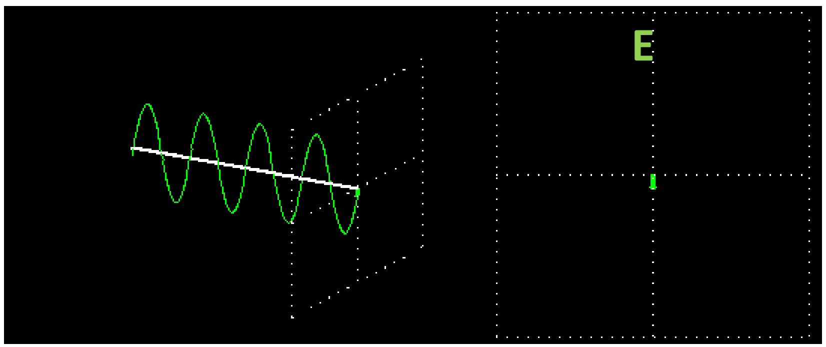
Az a legkisebb látószög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól. Közepes hullámhossz (550 nm) és pupilla átmérő (4 mm) értékekre: 0.6' (szögperc)

szem optikája gyakorlat

Polarizáció

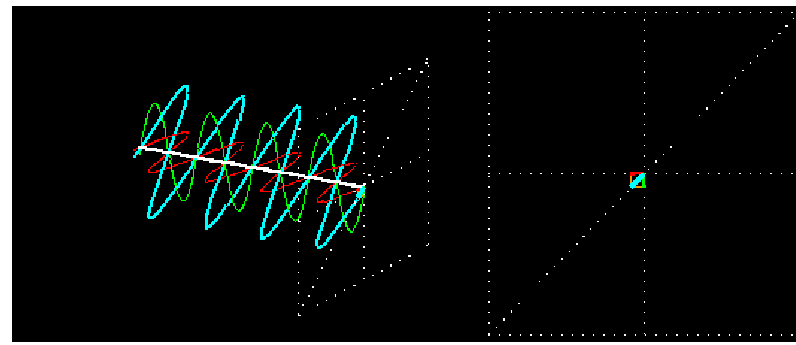


polarizációs irány: a fény *elektromos* hullámának iránya (az elektromos tér iránya)

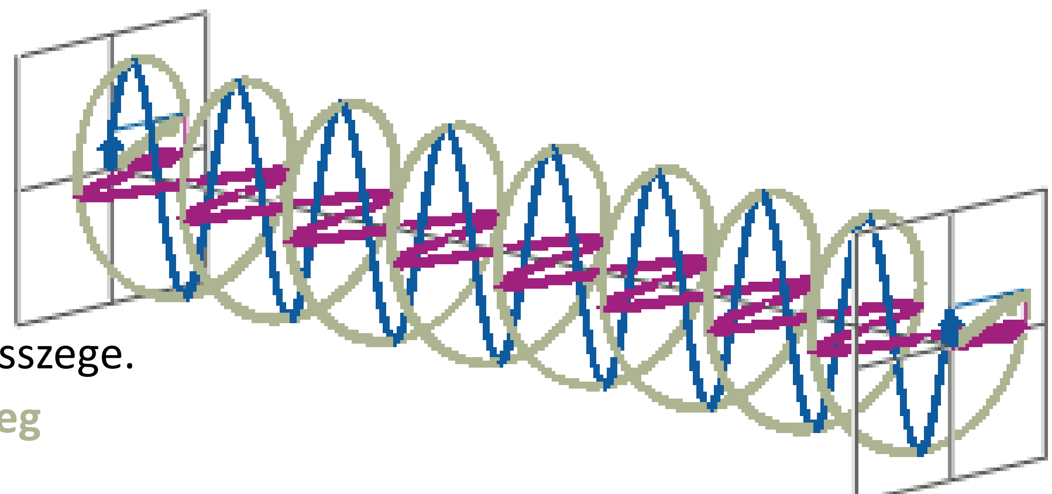


Lineárisan polarizált fény

két azonos fázisú, de merőleges polarizációjú hullám összege



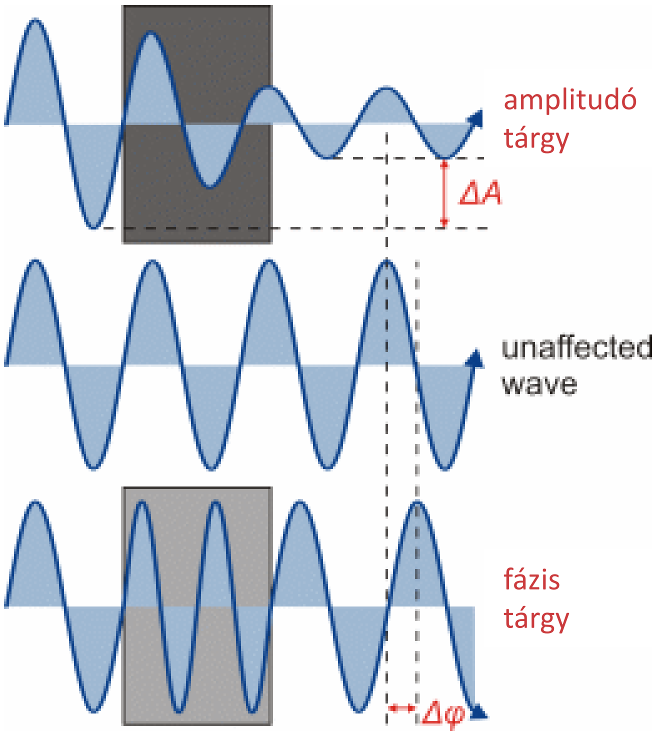
Cirkulárisan polarizált fény

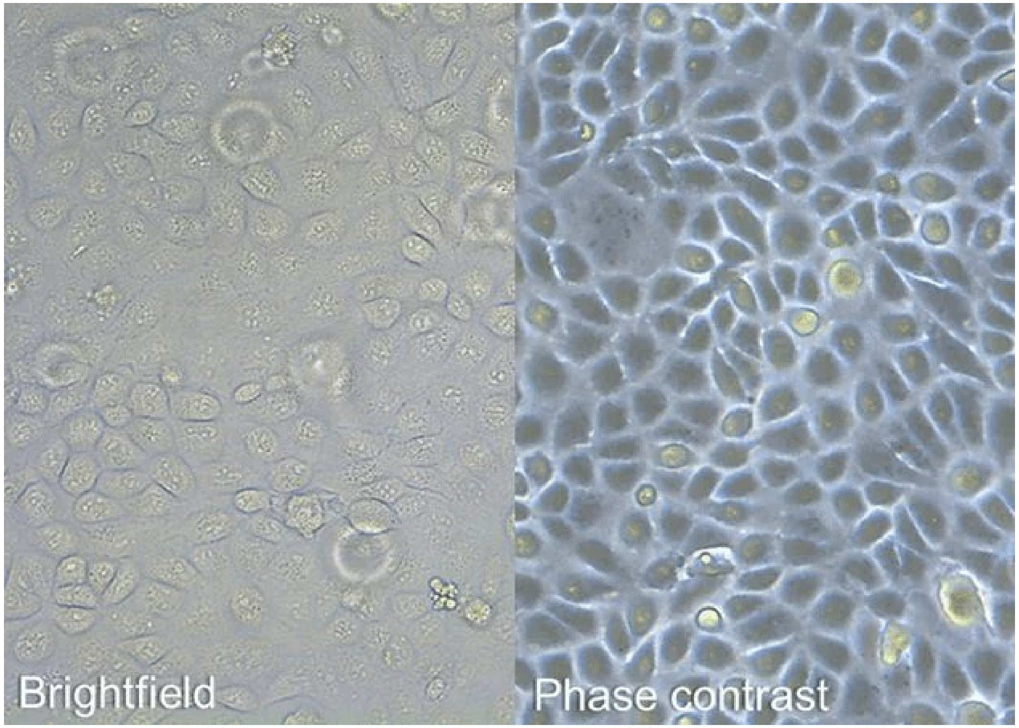


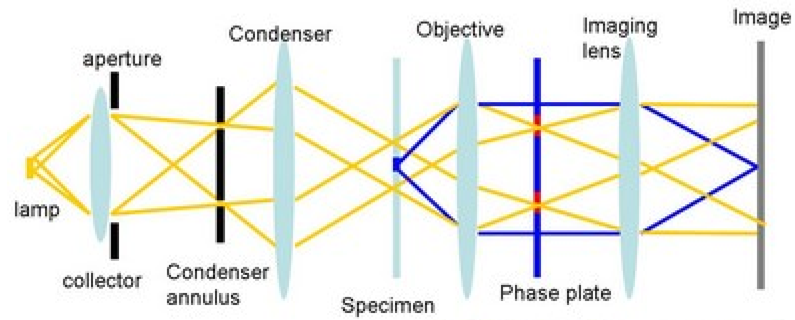
két merőleges lineárisan polarizált fény összege.

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

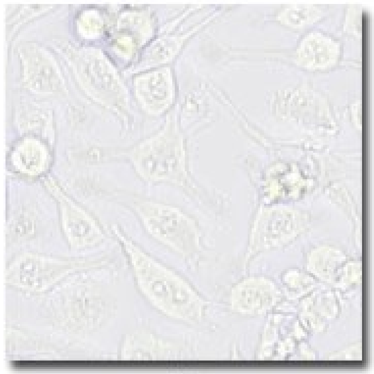
Fáziskontraszt mikroszkópia

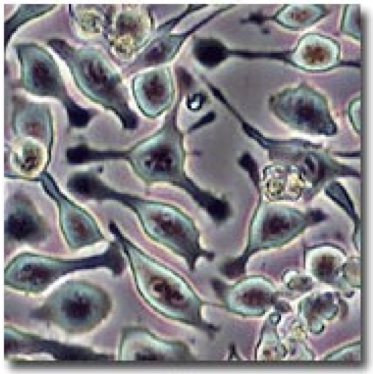






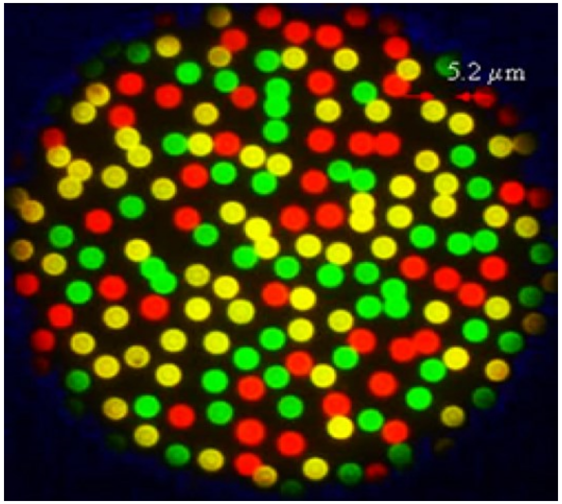
Az egyes elhajlási maximumok ügyes keverésével elérhető hogy ha a tárgyból kilépő fénysugarak különböző fázisú hullámokat tartalmaznak akkor a fáziseltérés a képen amplitúdó-eltérésként, azaz fényesség eltérésként jelentkezzen.

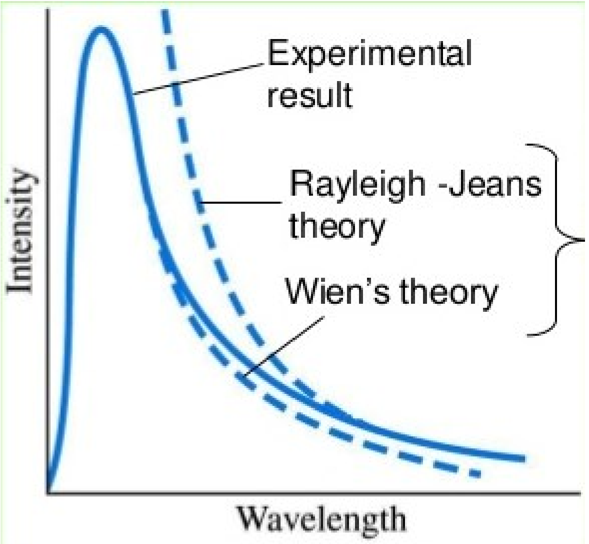


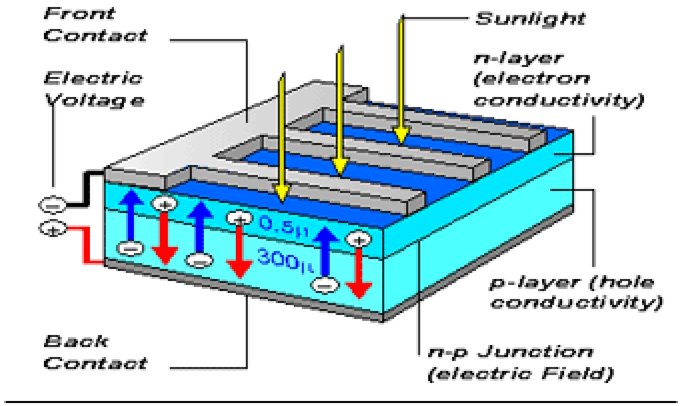


van amit a hullámtan sem tud teljesen megmagyarázni:

fényelektromos hatás
Kvantum pöttyök
fluoreszcencia
lézer
fekte test sugárzás







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

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

foton

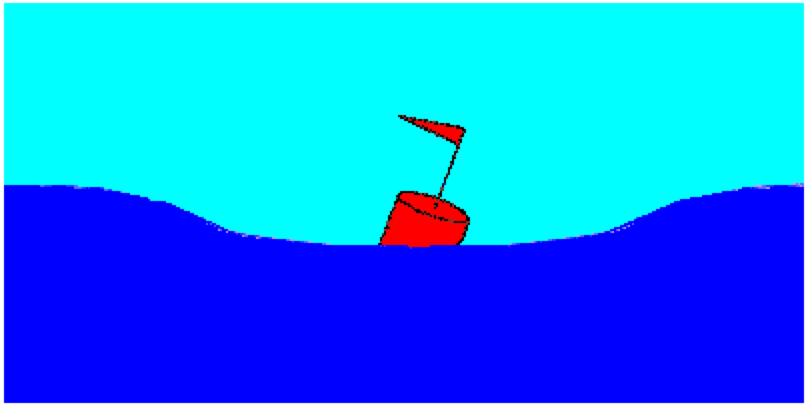
az energia nem folytonosan hanem adagokban (kvantum) terjed: $E=N\cdot\varepsilon$, $\varepsilon=h\cdot f$

Planck-állandó $h = 6.6\cdot10^{-34}$ Js

Előadás vége

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

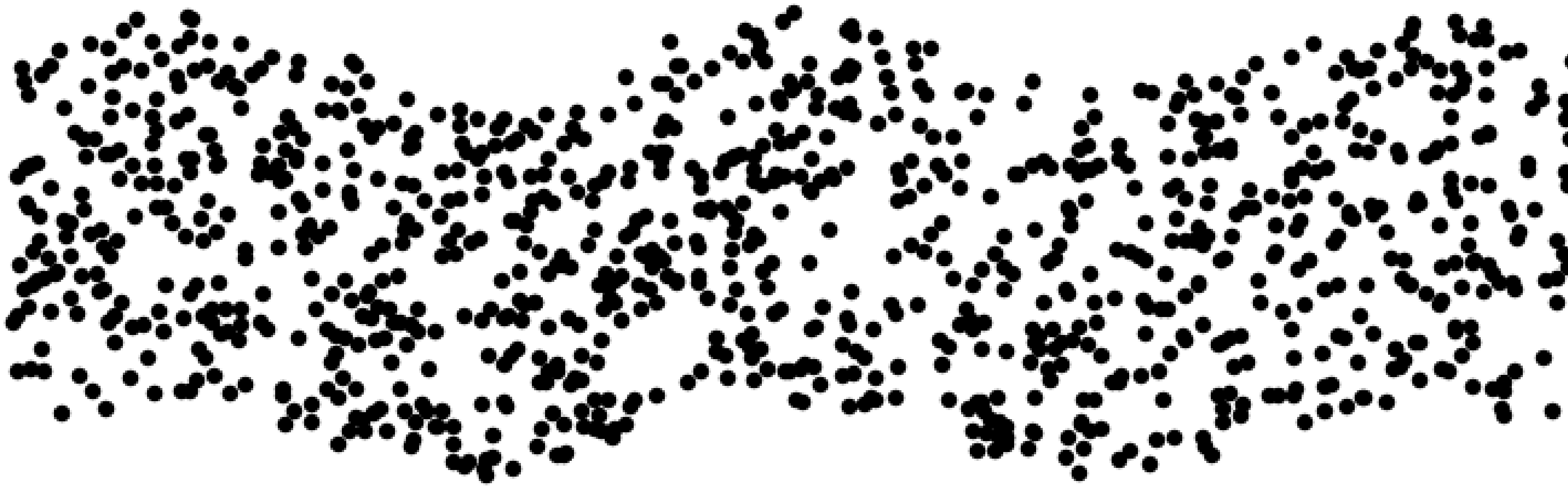
a hullámokat a hullámegyenlet írja le, mely megadja a részecskék mozgását a hely és idő függvényében



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

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

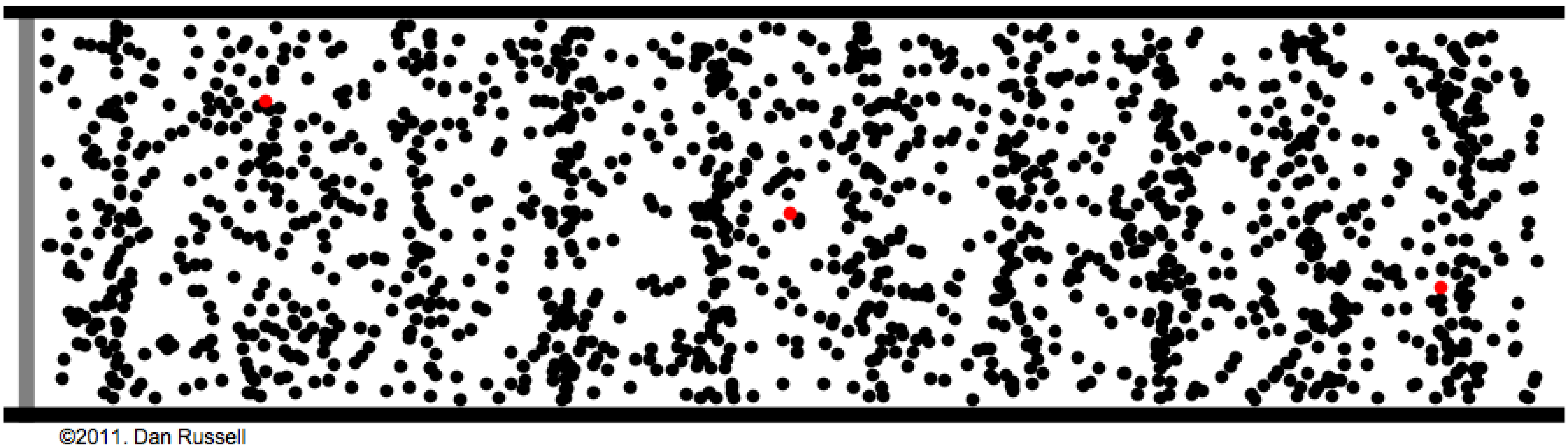
transzverzális hullám



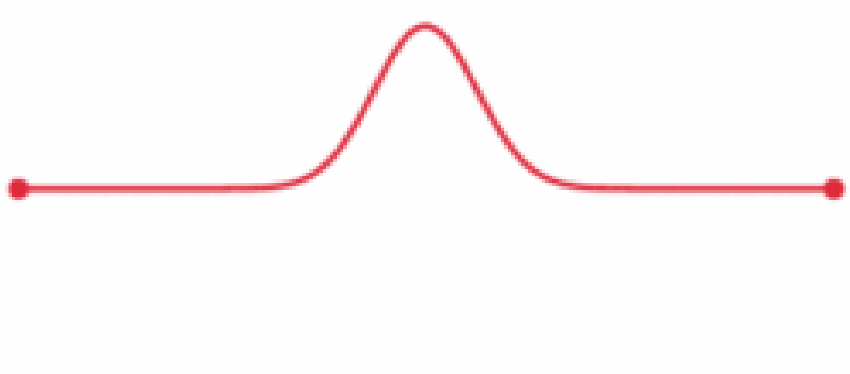
A hullámfront haladási iránya **merőleges** a részecskék mozgására

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

Longitudinális hullámok:
A hullámfront haladási iránya **párhuzamos** a részecskék mozgásával



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:

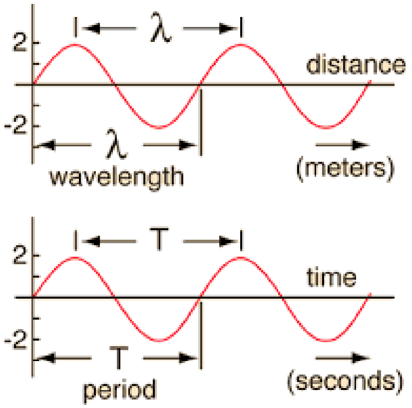
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

valamely tulajdonság, pl kitérés értékének (itt “u”) időbeli (du/dt) és térbeli (du/dx) megváltozását vizsgáljuk, de a változás mértékének a változása is érdekes ($d^2u/d\dots^2$), 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:

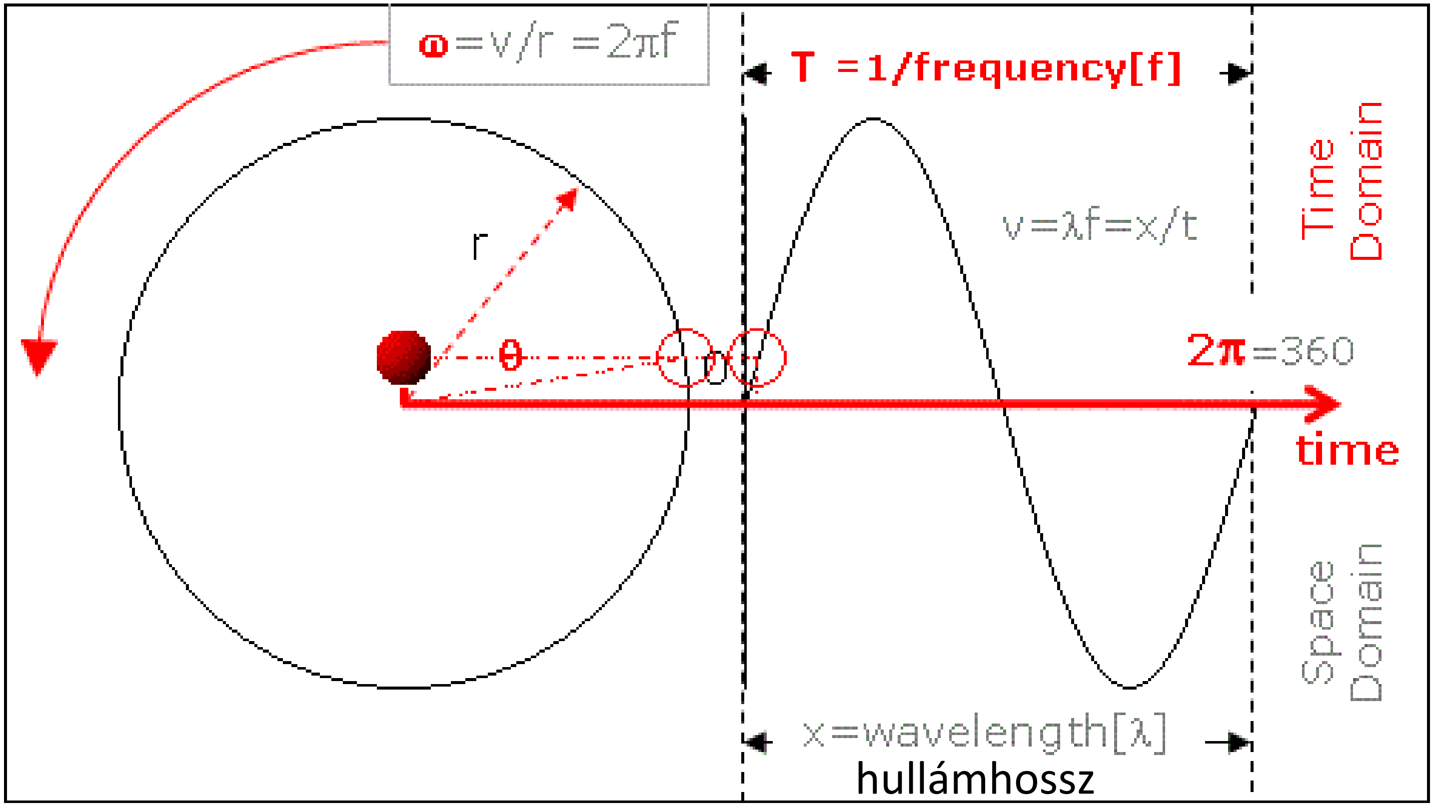
$u(x,t) = A * \sin(k*x + \omega*t + \phi)$
ahol
A az amplitúdó, k a hullámszám és ω a szögsebesség.

$\omega = 2\pi f$, 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.

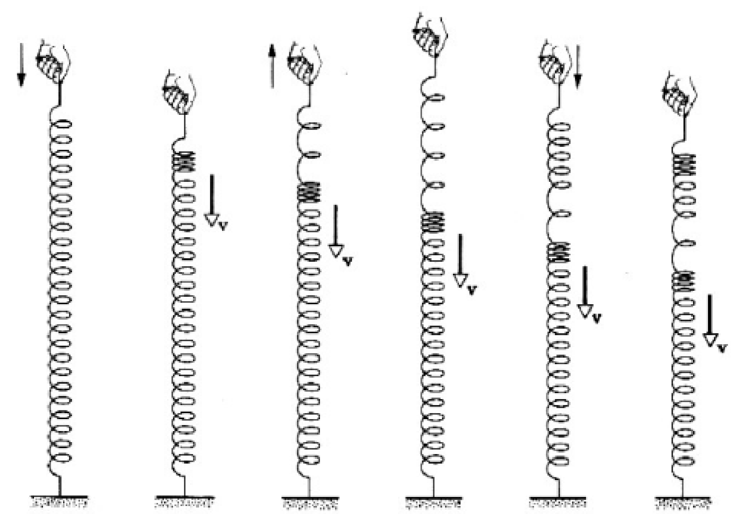
A **harmonikus mozgás** a legtöbbet használt eset:

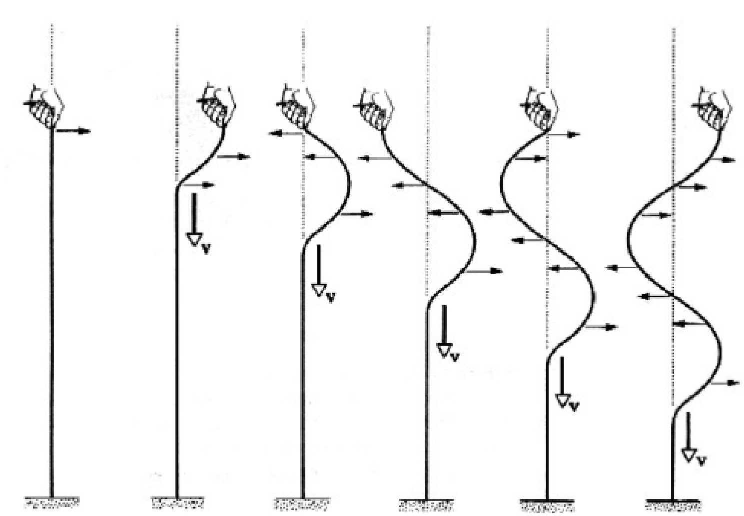


Hullámfajták

- 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:

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

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

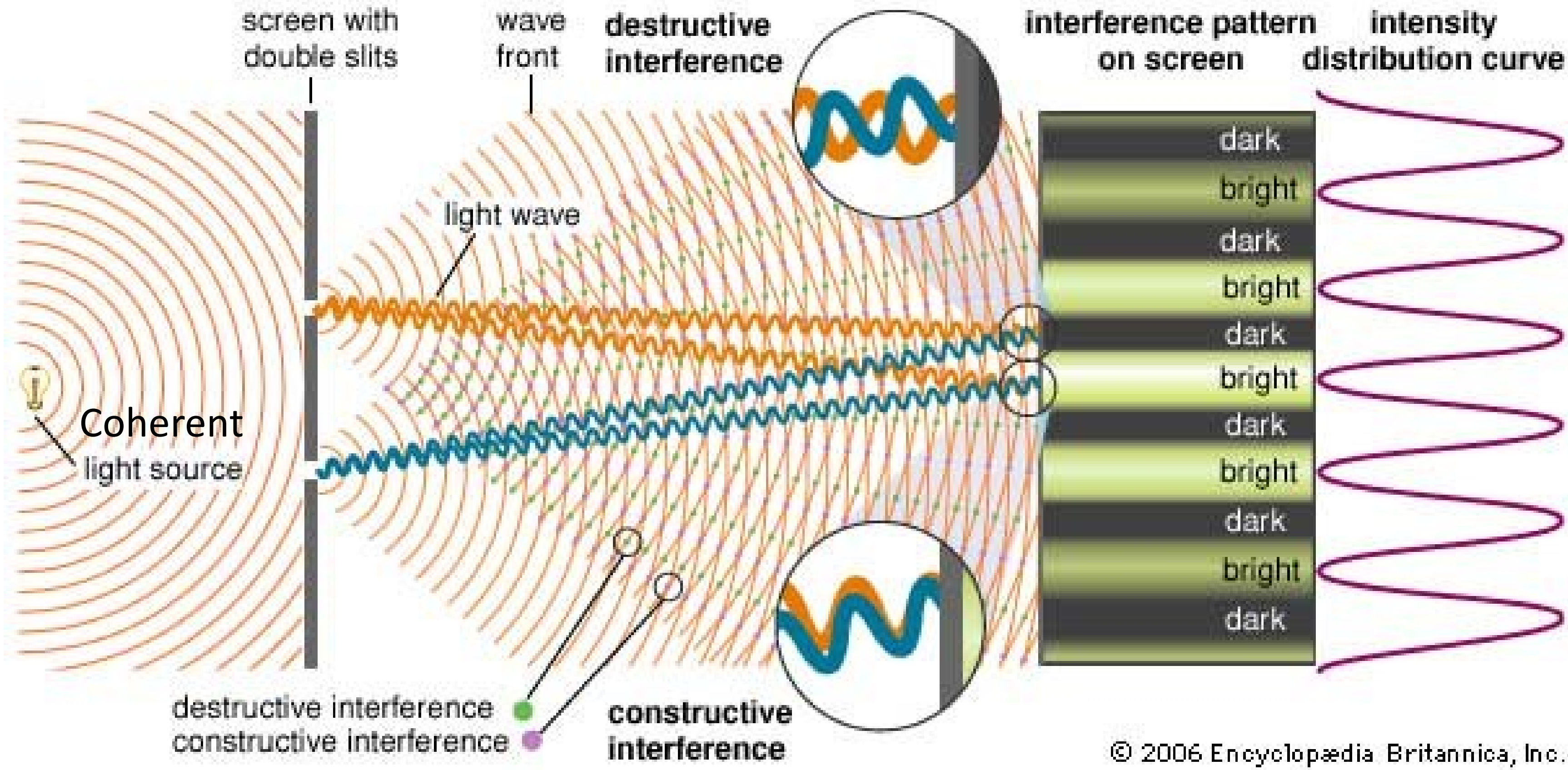
itt a ∇ a változás változását jelenti $d^2/d\ldots^2$ 3 dimenzióban

a megoldás megint trigonometrikus, DE most **x,k** vektor benne:

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

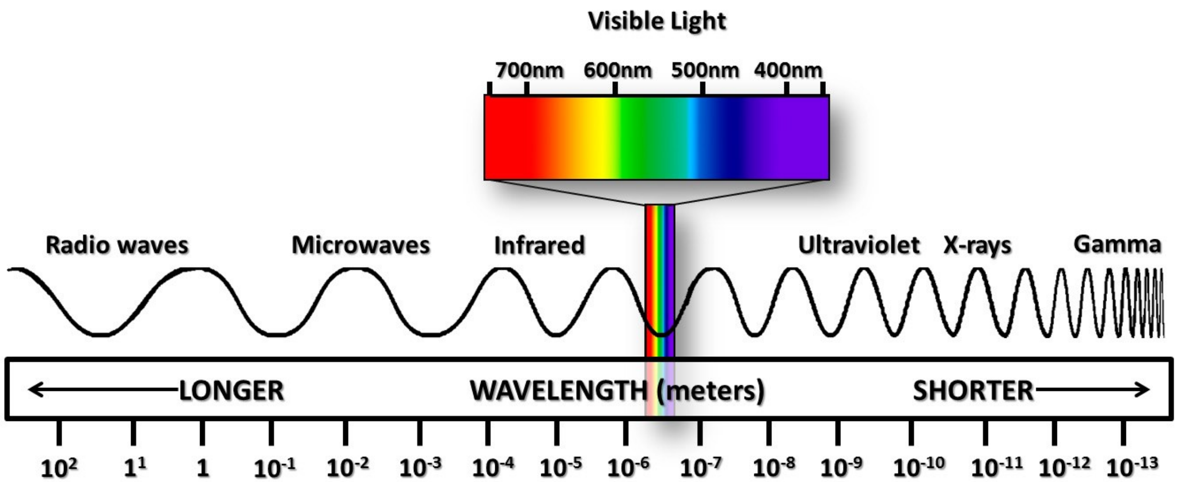
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)$$

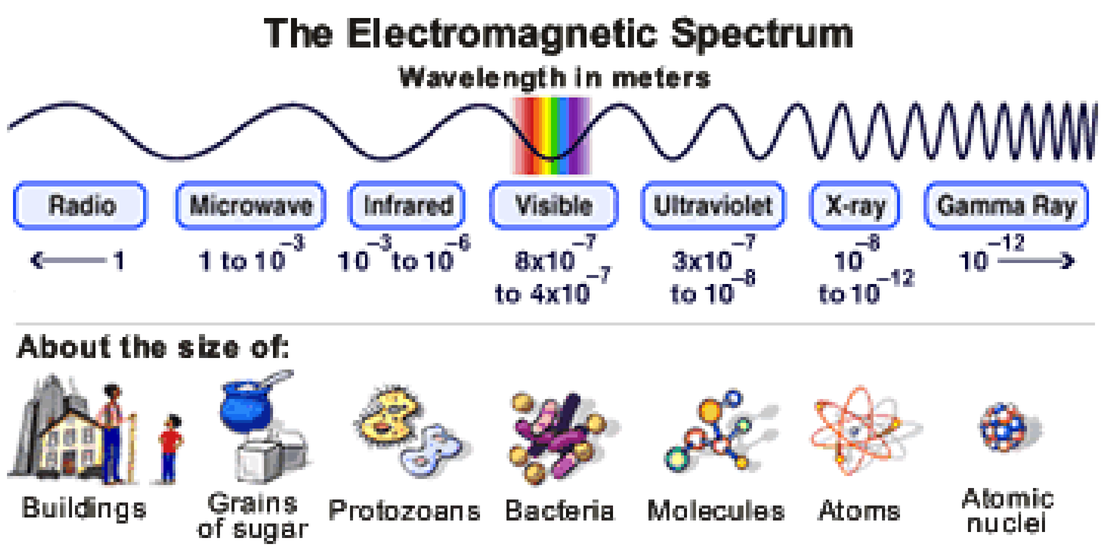
A Huygens-Fresnel elv és az interferencia megmagyarázza a Young-féle kísérletet!



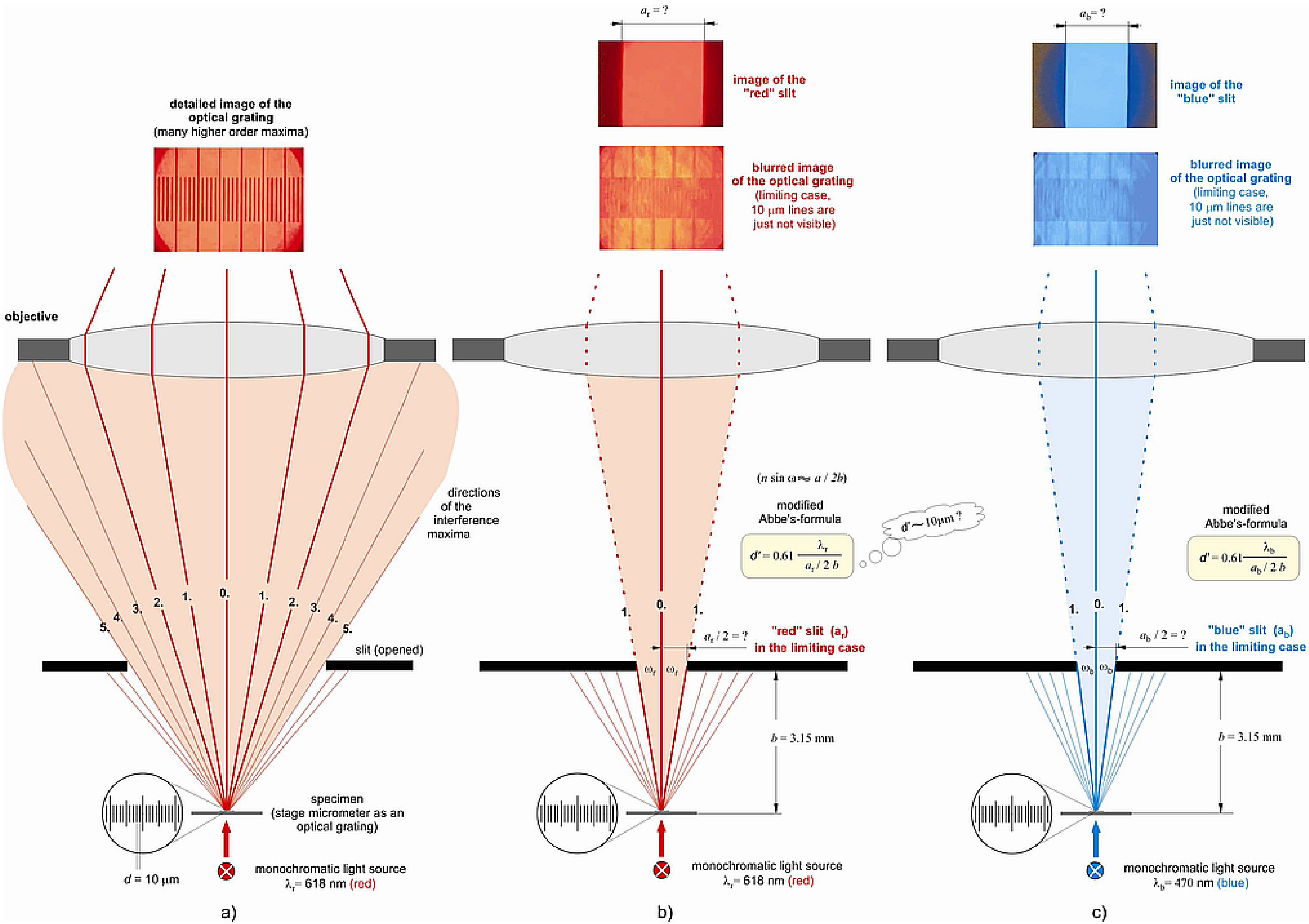
Alkalmazás

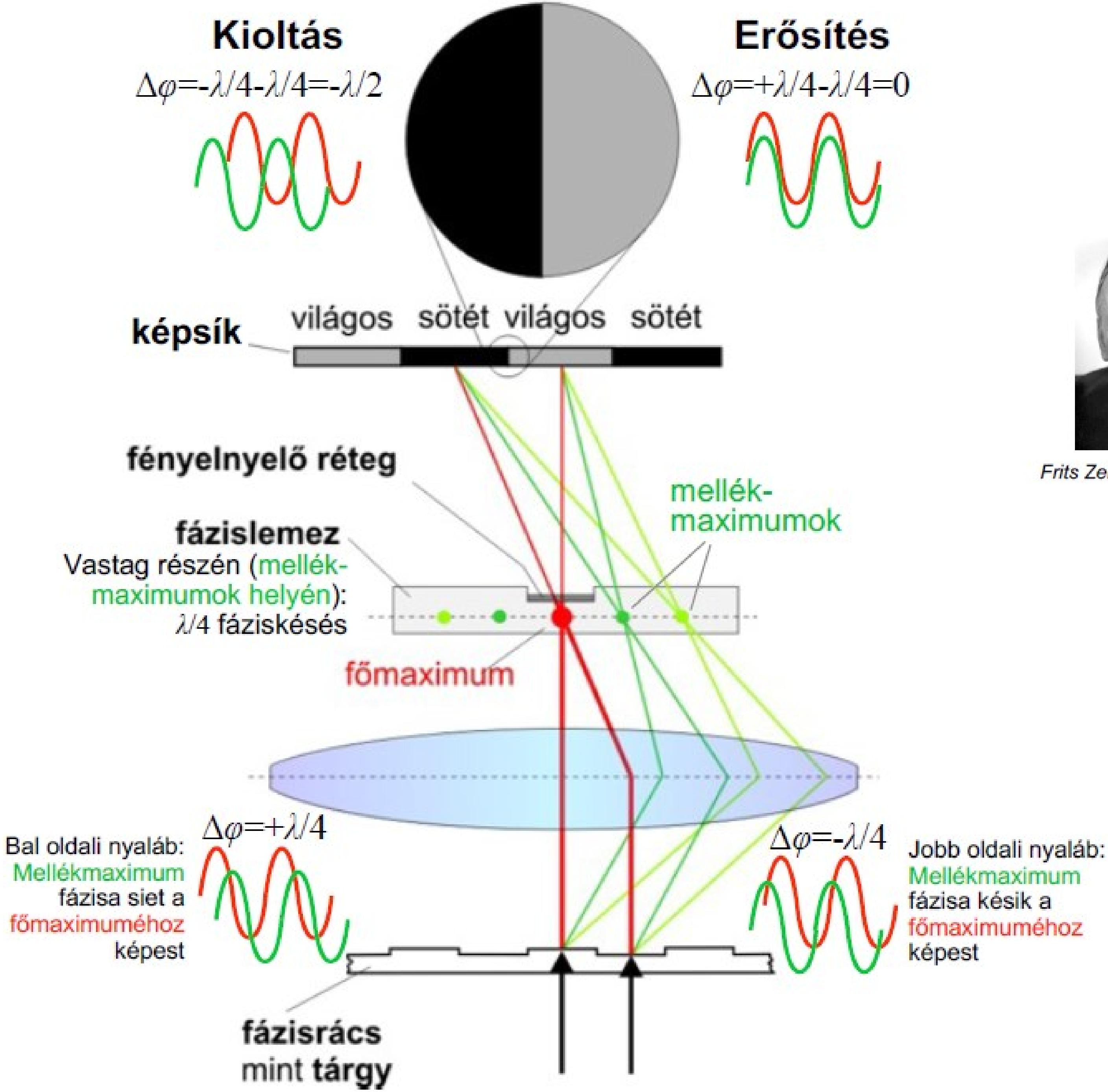
az optikai ráccsal a fényt frekvenciák (hullámhossz) szerint fel lehet bontani





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





Frits Zernike (1888-1966)
Nobel-díj