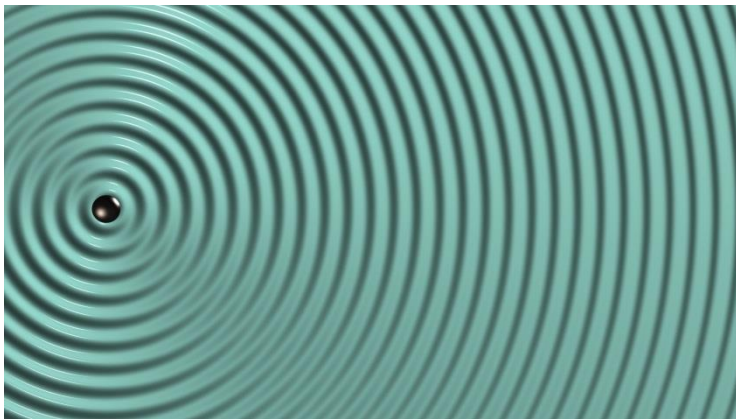
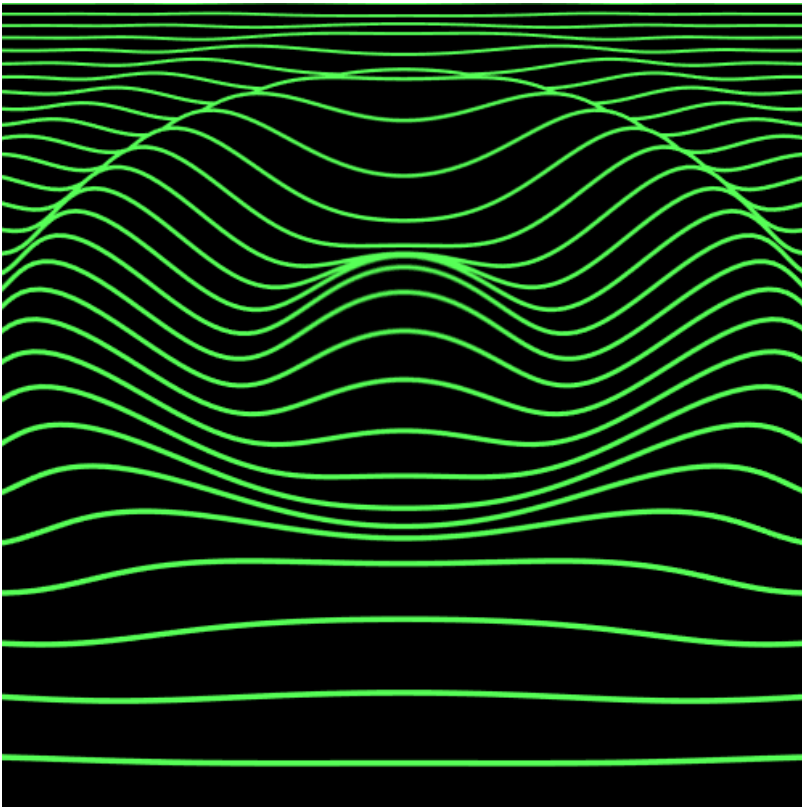


# Hullámoptika

nem csak optikában vannak hullámok...

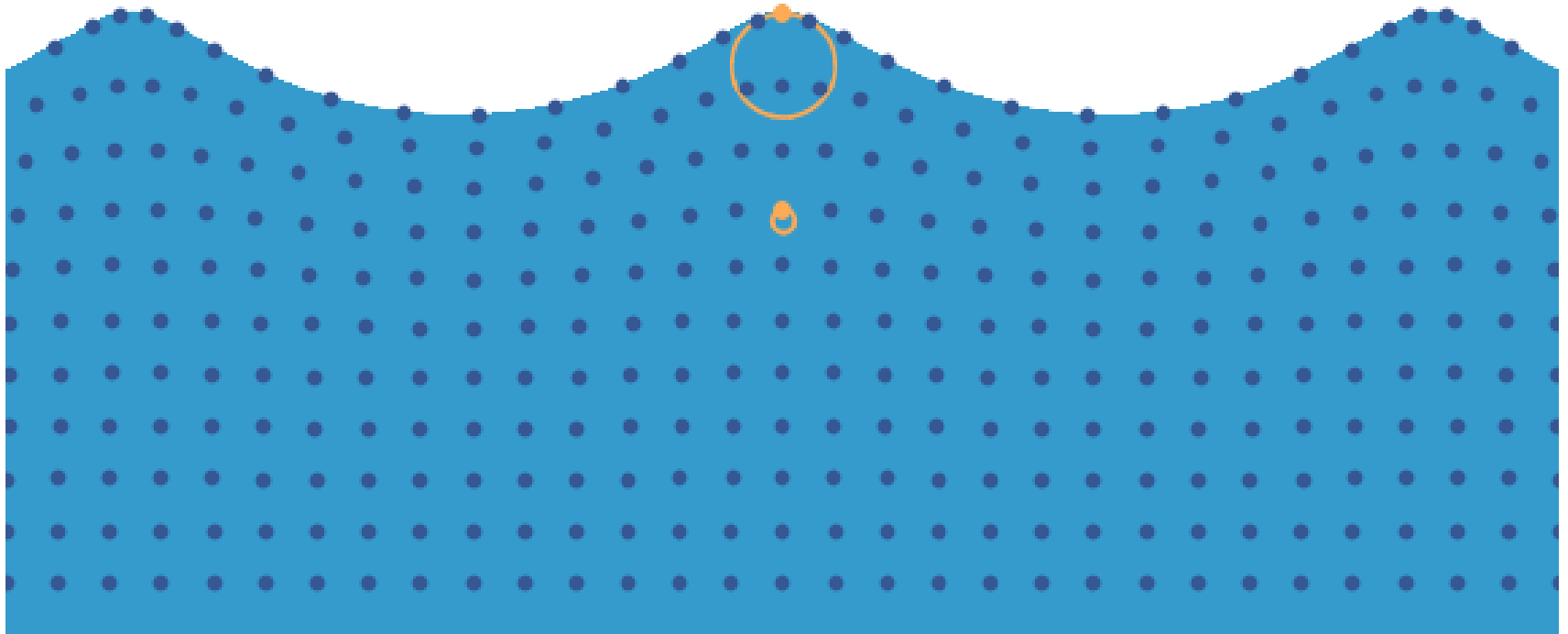


G.Schay



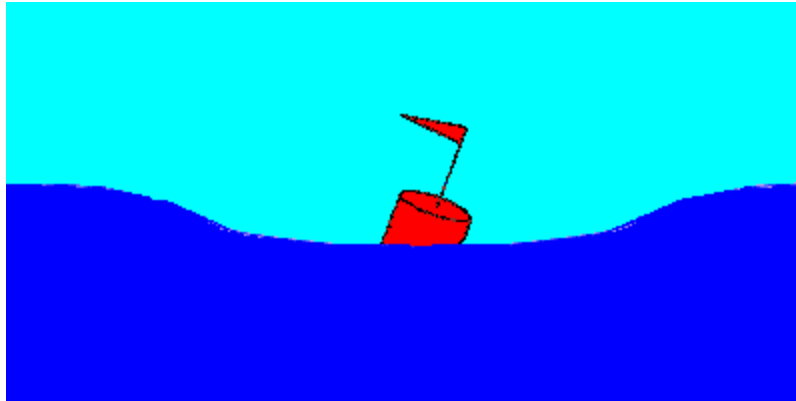
## Vízfelszíni hullámok

©2016, Dan Russell



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

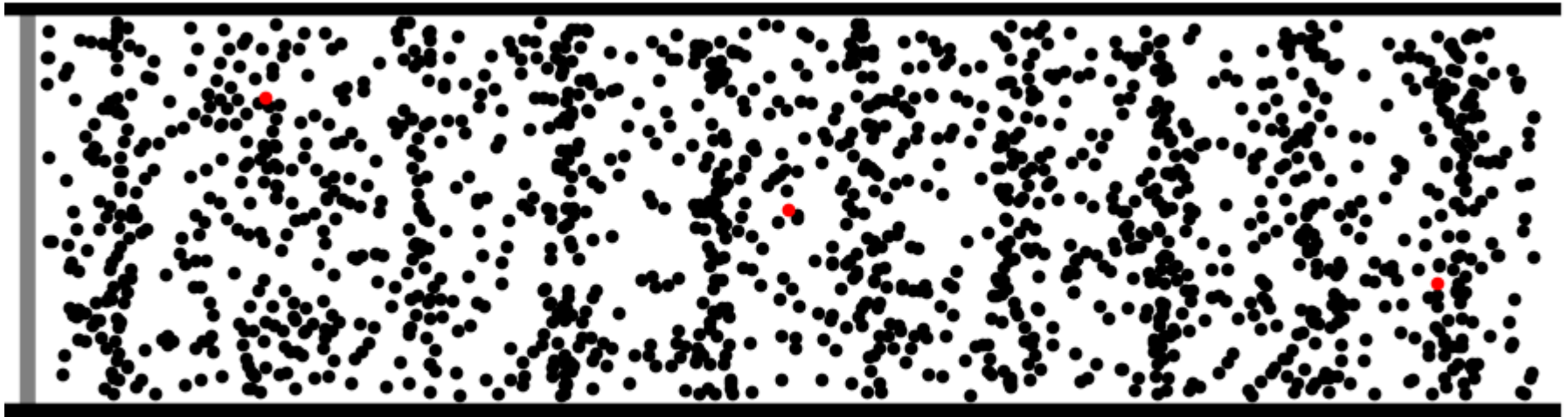
a hullámokat a hullámegyenlet írja le, mely megadja a részecskék mozgását a hely és idő függvényében



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

Longitudinális hullámok:

A hullámfront haladási iránya párhuzamos a részecskék mozgásával

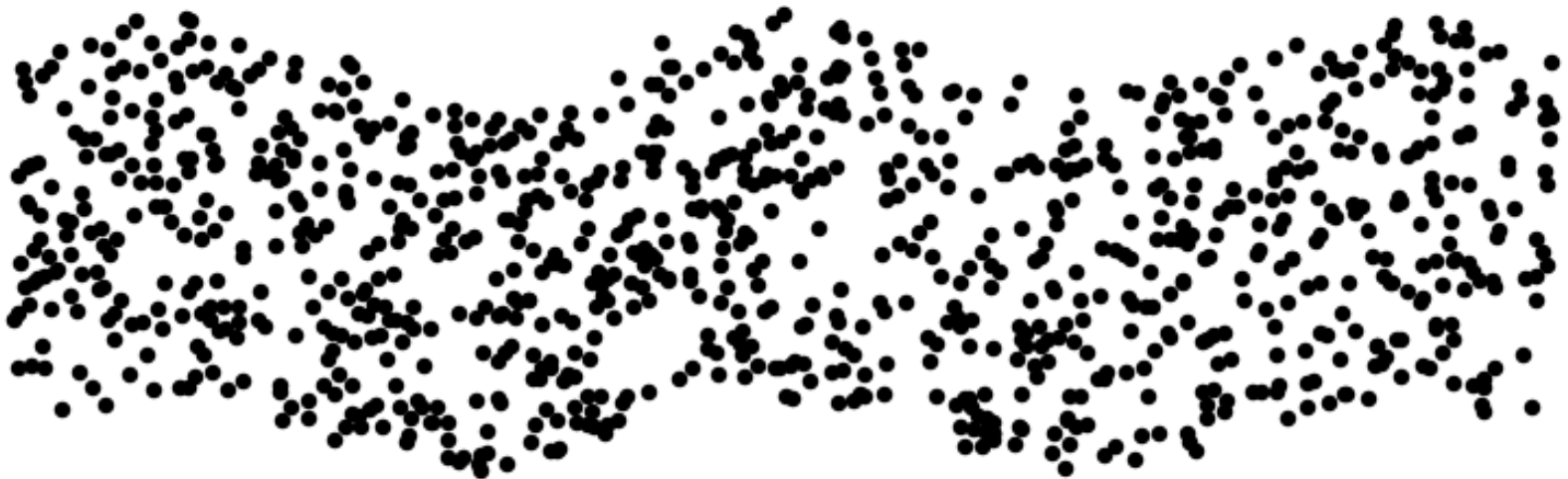


©2011. Dan Russell



A hullám forrása (itt egy mozgó felszín)

transzverzális hullám



A hullámfront haladási iránya merőleges a részecskék mozgására



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

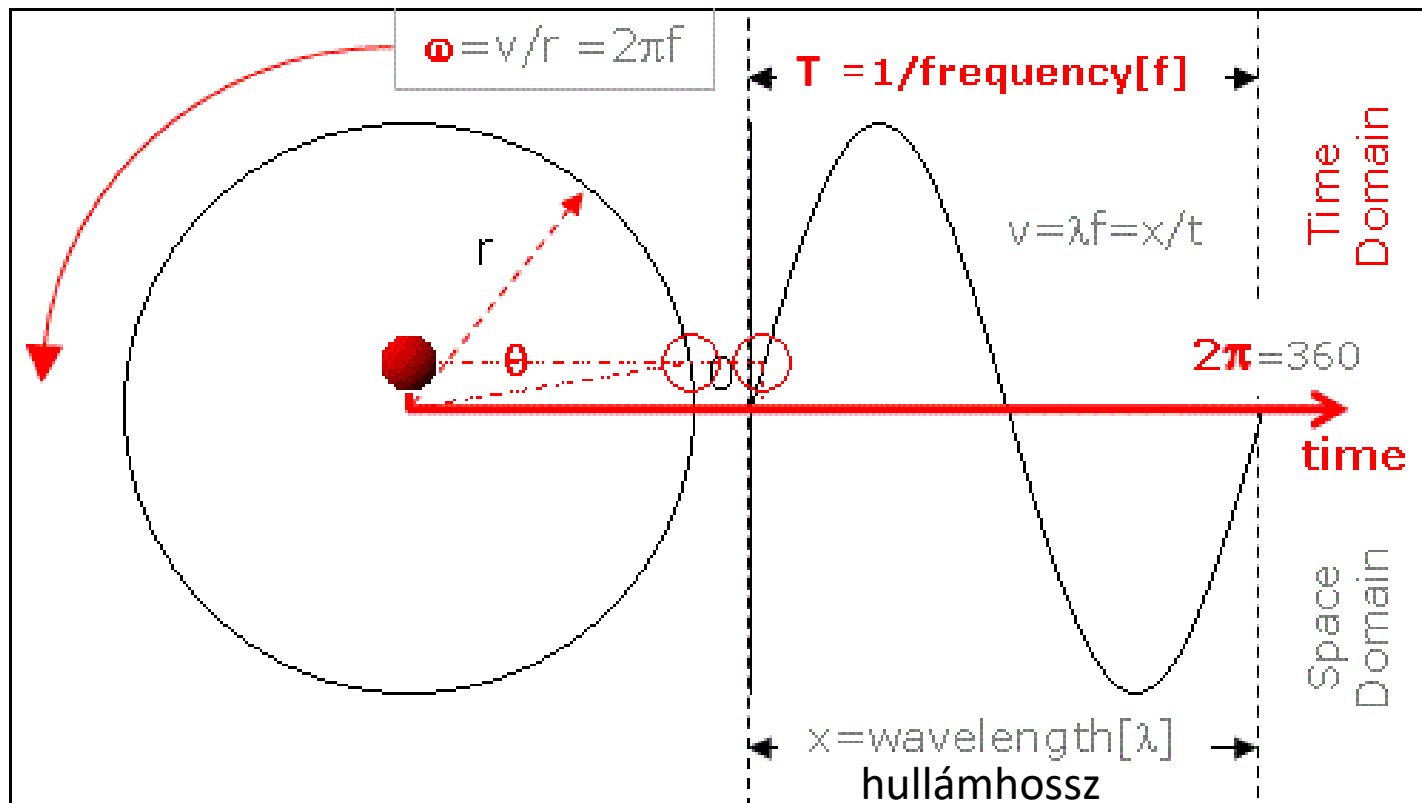


itt a mozgás-állapot például az egyes részek kimozdulásának mértéke.



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

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



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<sup>2</sup>u/d...<sup>2</sup>), 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:

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

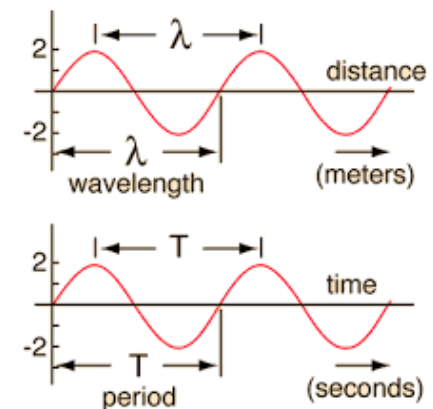
ahol

A az amplitúdó, k a hullámszám és  $\omega$  a szögsebesség.

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

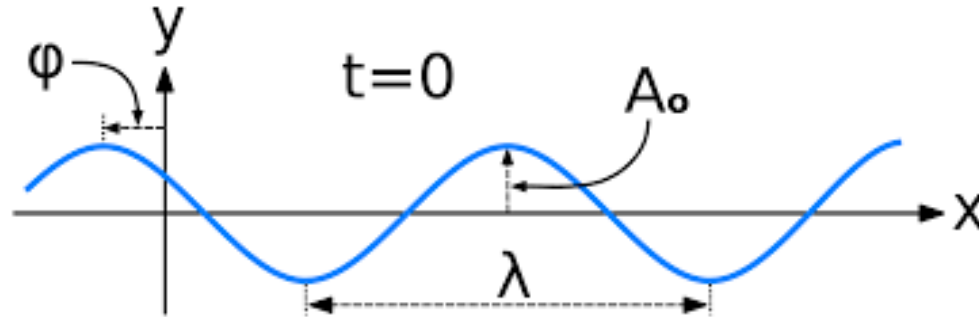
$\omega = c*k$  adja meg a hullámszámot, azaz  $k = 2\pi/\lambda$ .

ahol  $\lambda$  a hullámhossz.

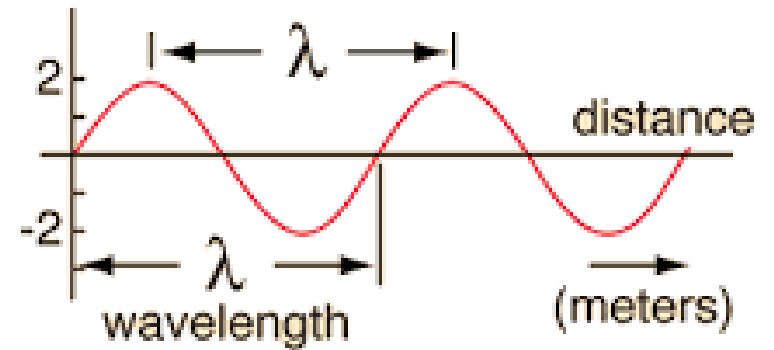




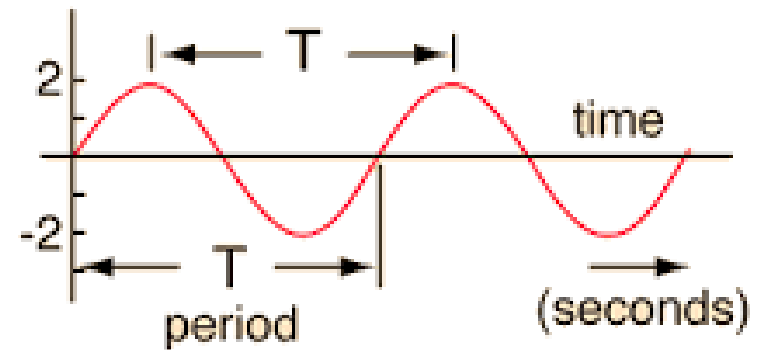
grafikusan



pillanatfelvétel



egy adott pontban az időbeli változás



# Hullámfajták

- Keletkezés **mechanizmusa** szerint:

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

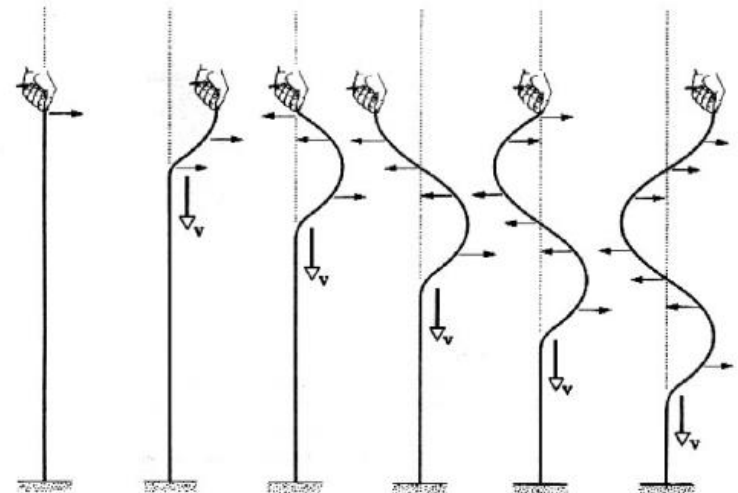
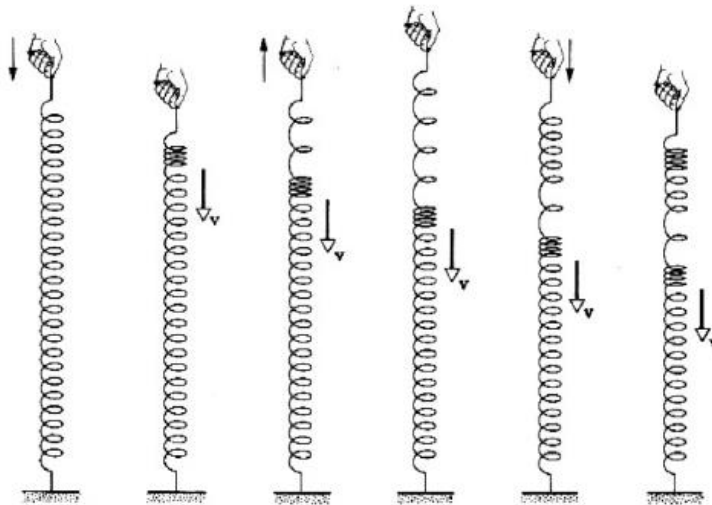
- Terjedés **dimenziója** szerint:

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

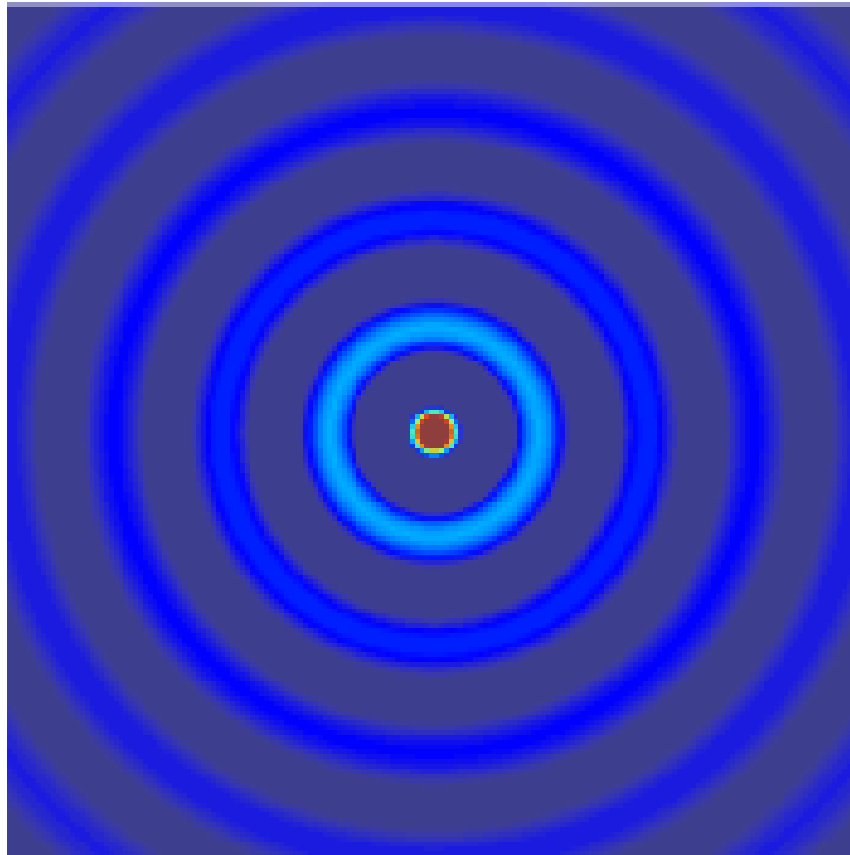


- A rezgés és terjedés relatív **irányai** szerint:

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

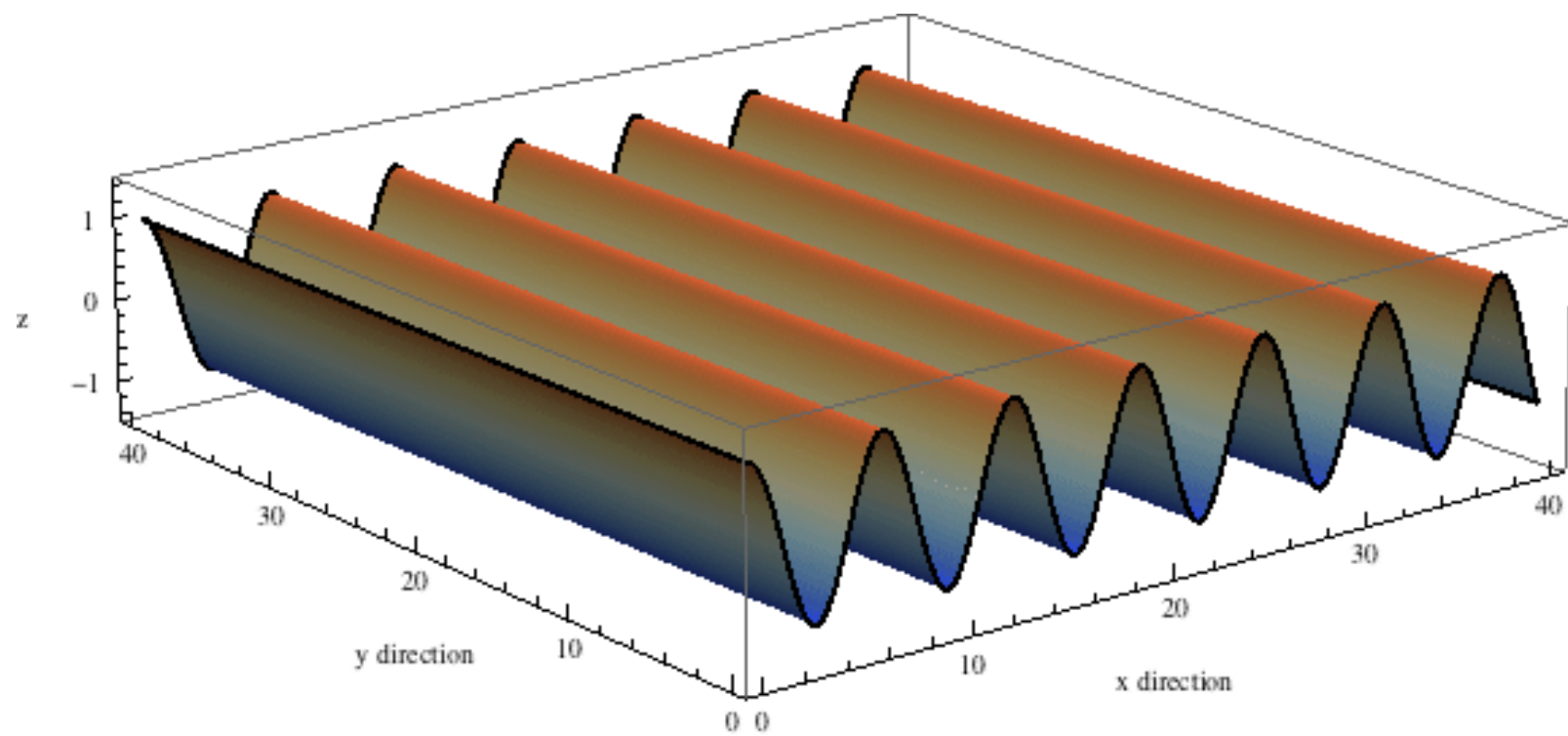


pontszerű hullámforrás, homogén közegben  
(tehát mindenfele egyformán terjed)



kör- vagy gömbhullám

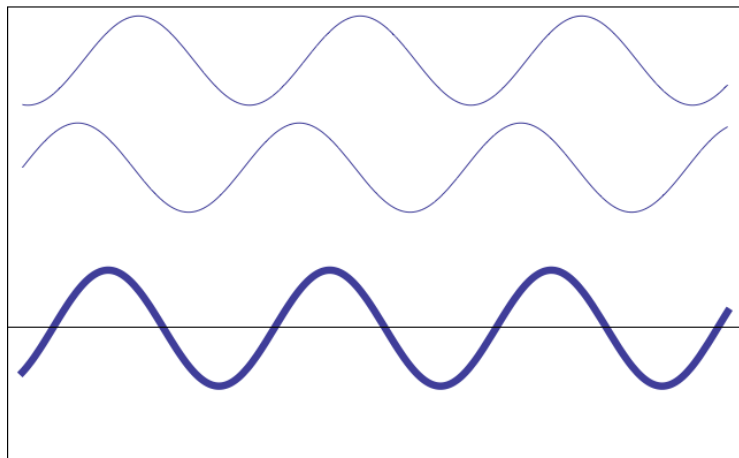
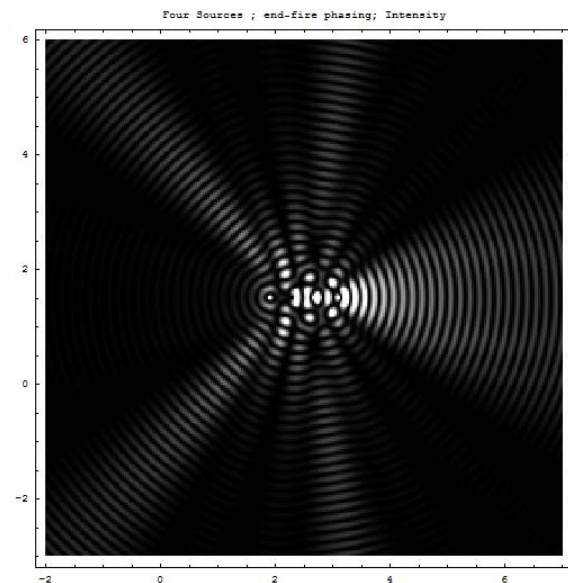
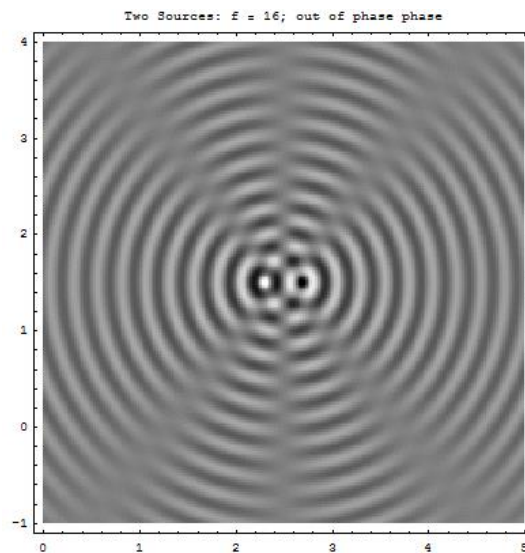
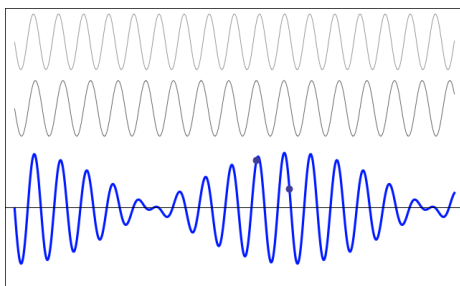
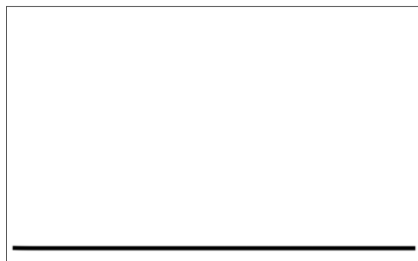
síkhullám



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

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

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

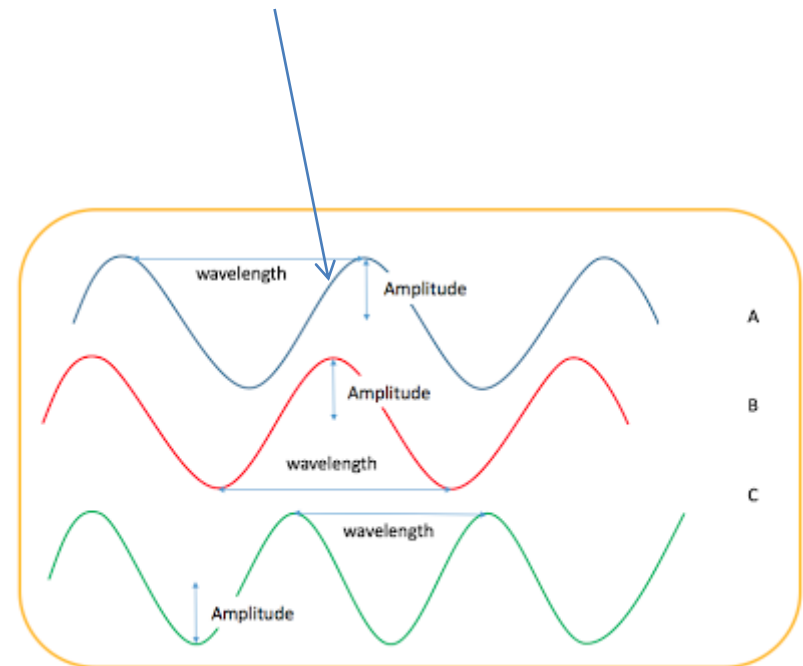
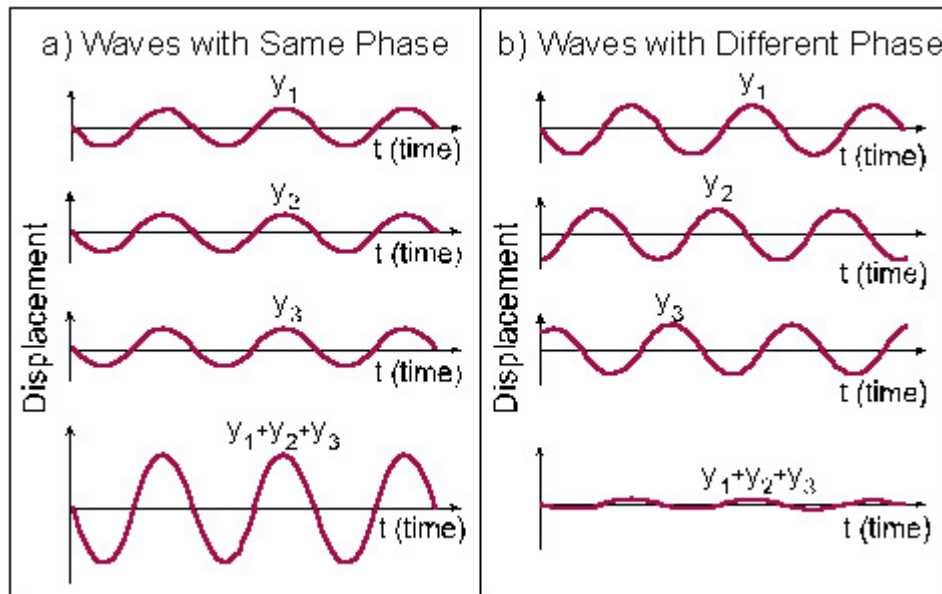


<https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/superposition/superposition.html>



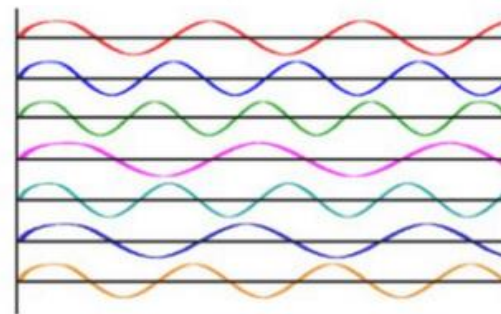
Koherens hullámok: az egyes hullámok közötti **fázis-eltérés** időben állandó.

koherens hullámok ki tudnak alakítani időben stabil mintázatot

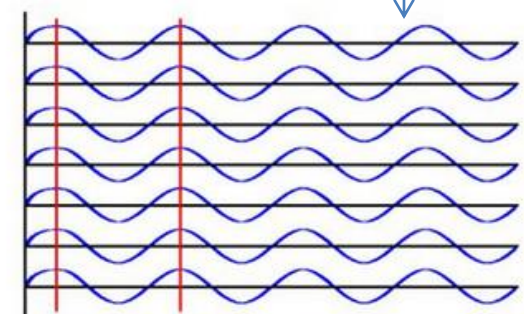


Konstruktív interferencia:  
„maximum – maximummal”

Destruktív:  
ellentétes fázisban találkoznak



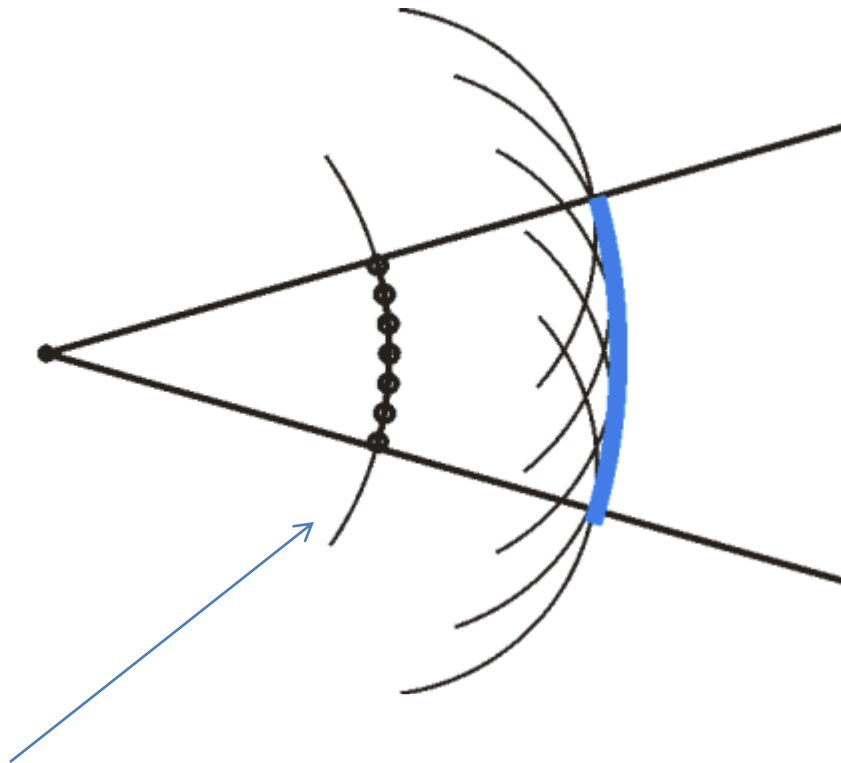
Incoherent light waves



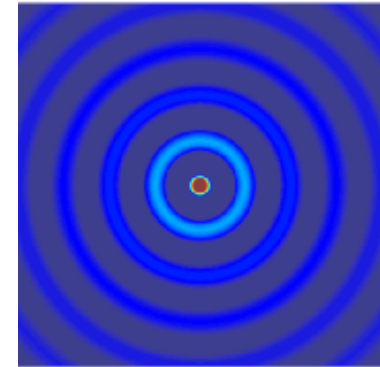
Coherent light waves

## 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)



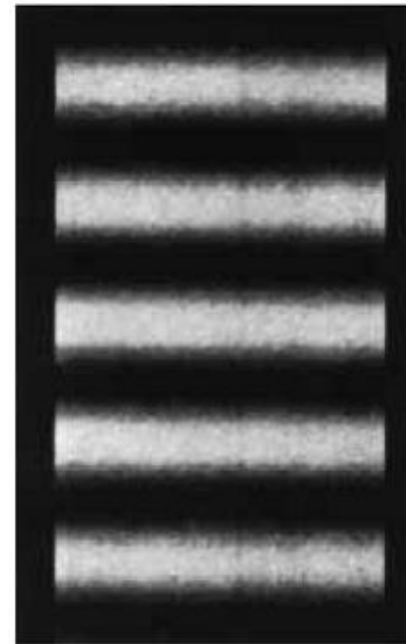
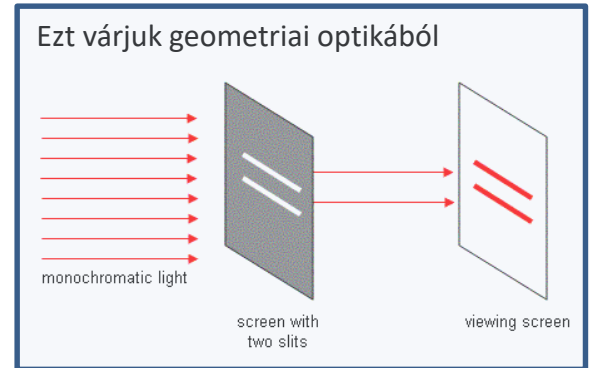
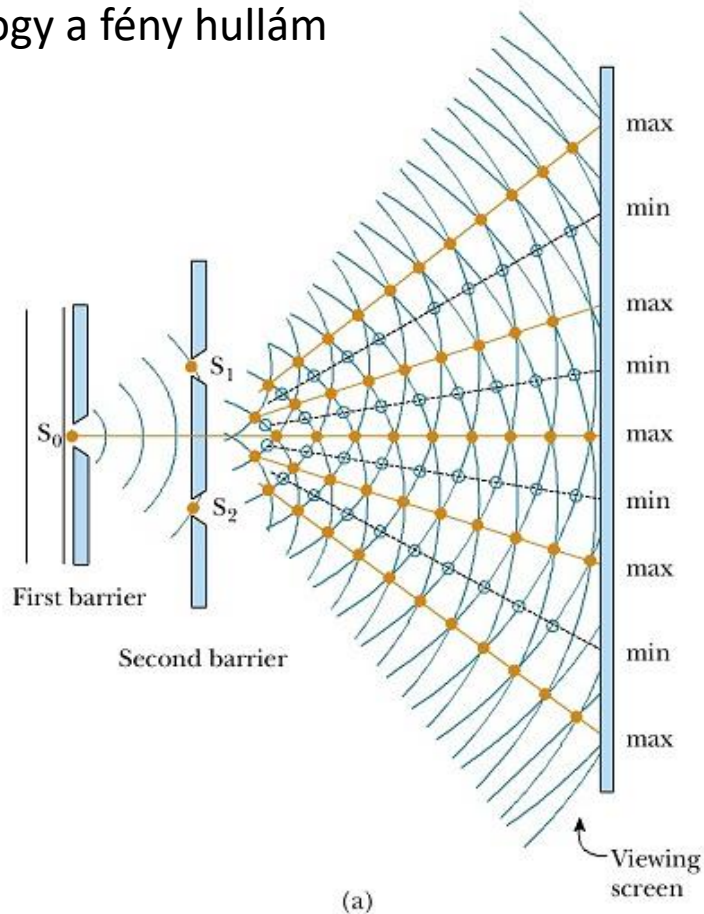
Augustin-Jean Fresnel  
(1788-1827)



# Kísérletek amiket csak a hullámtan magyaráz meg

## Young-féle két-réses kísérlet

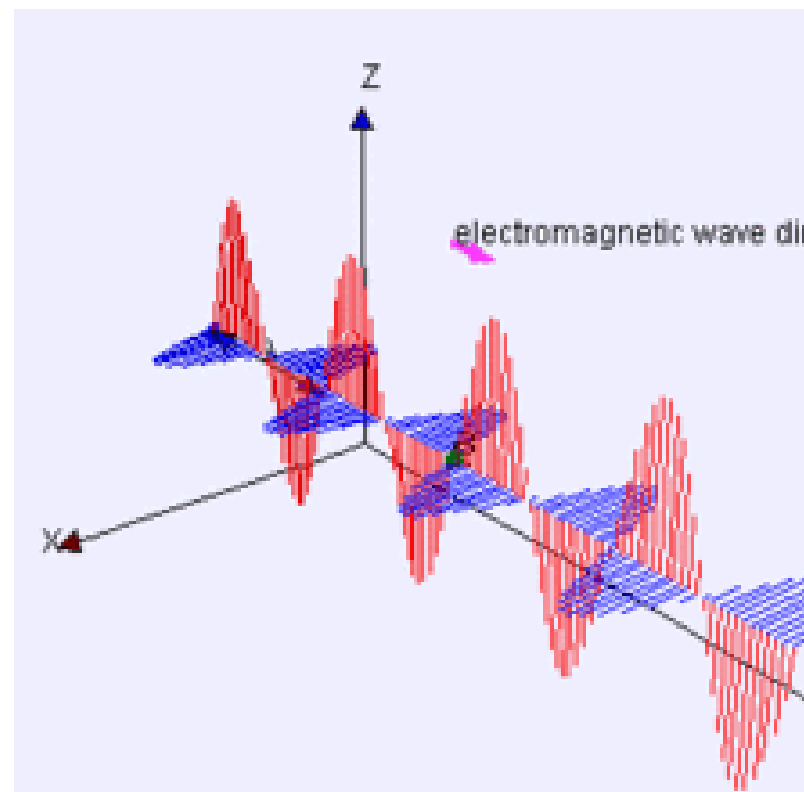
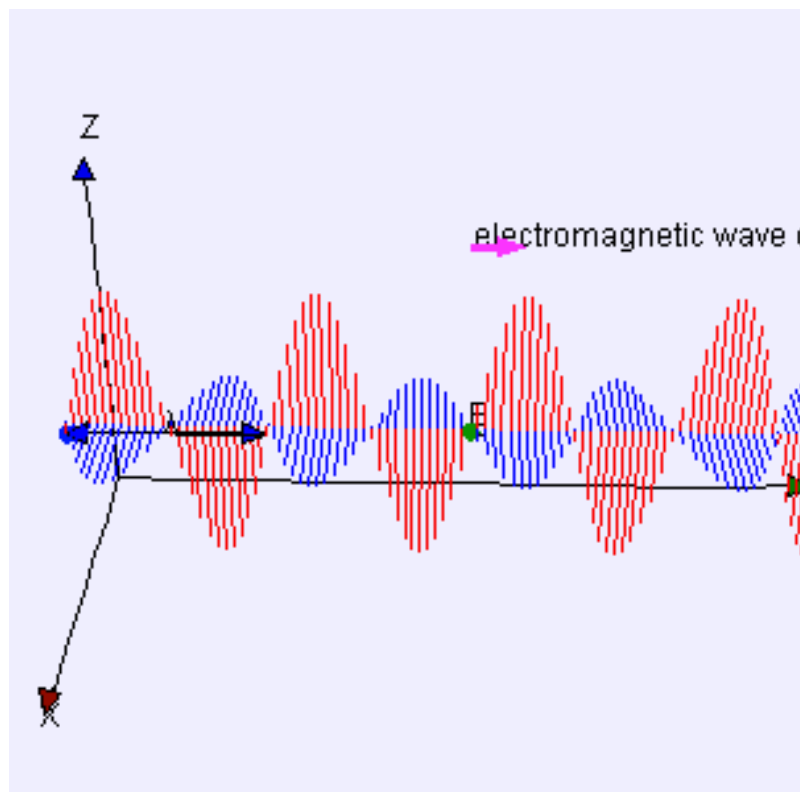
ez bizonyítja hogy a fény hullám



Thomas Young



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



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  $\nabla$  a változás változását jelenti  $d^2/d...^2$  3 dimenzióban

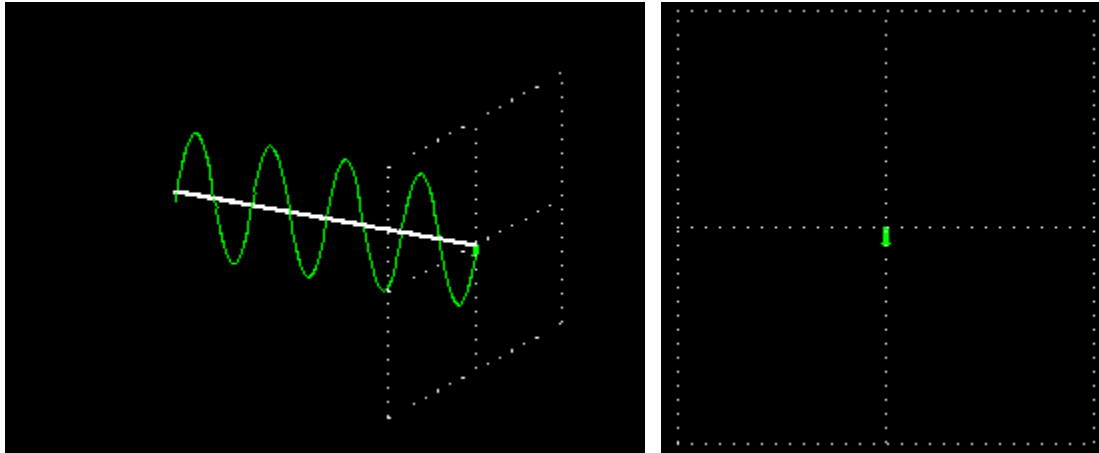
$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - c_0^2 \cdot \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

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

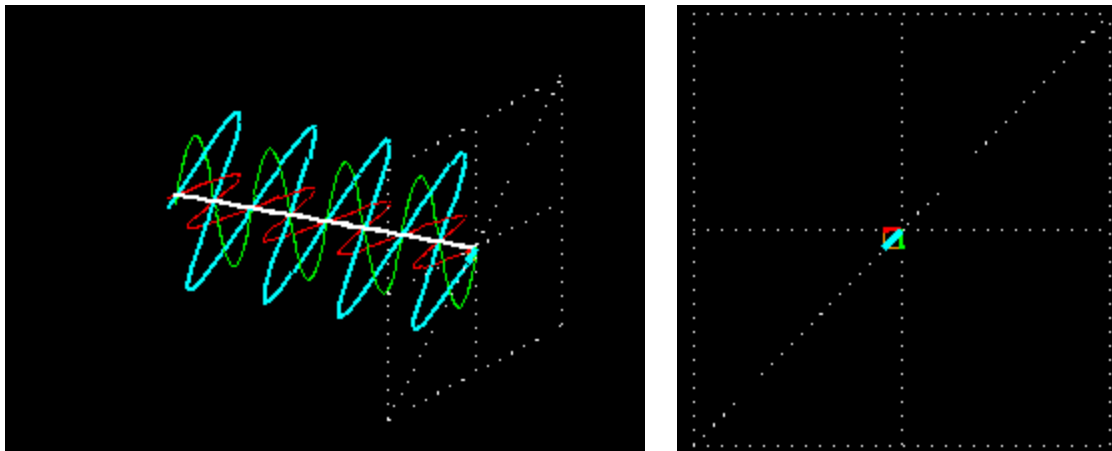
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)$$

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

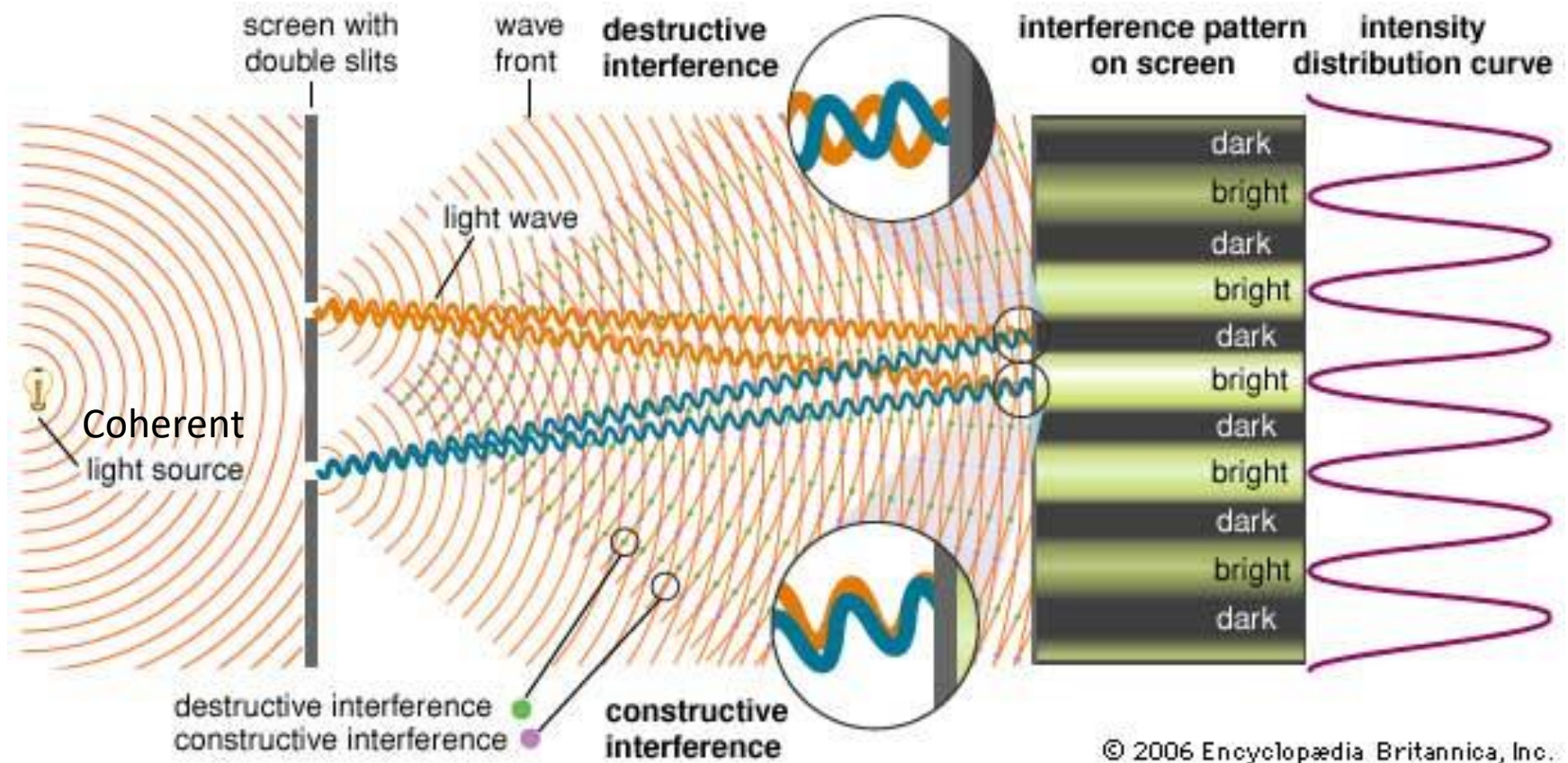
Általában csak az E teret rajzoljuk le, mivel a B úgys merőleges rá, így az ábrák egyszerűbbek lehetnek. DE ettől még mindig mindkettő jelen van!



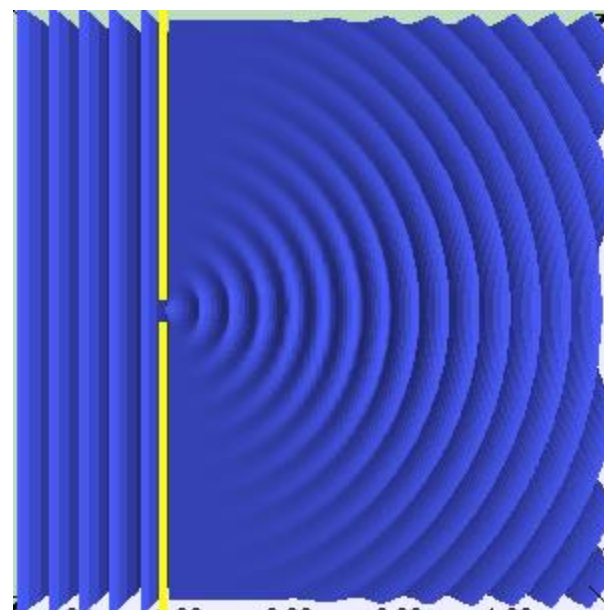
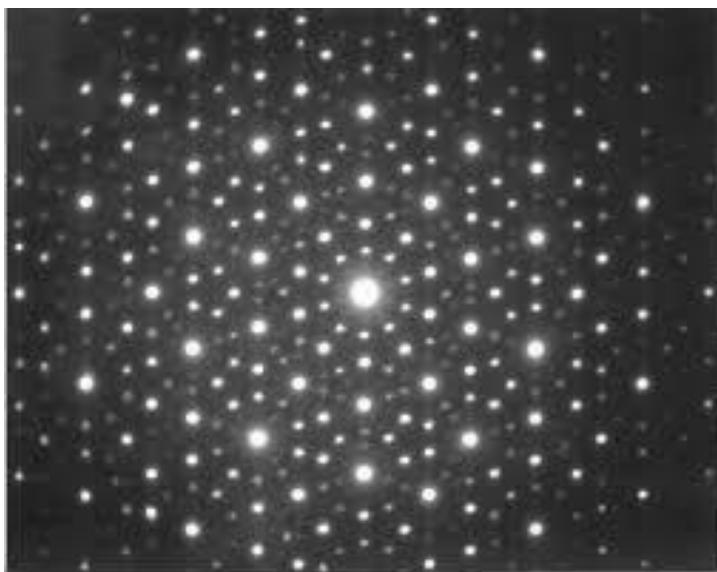
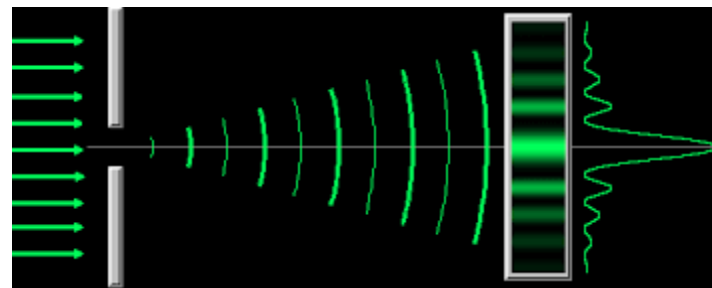
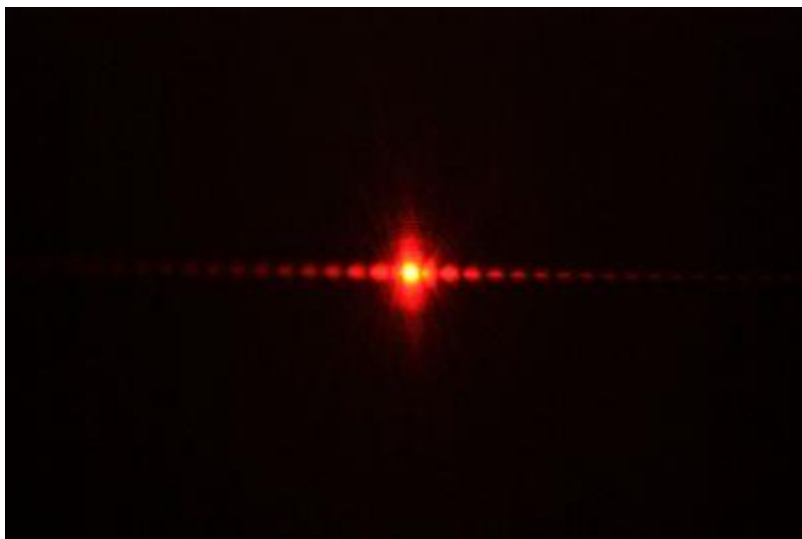
ha két eltérő állású E-vektort adunk össze:



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

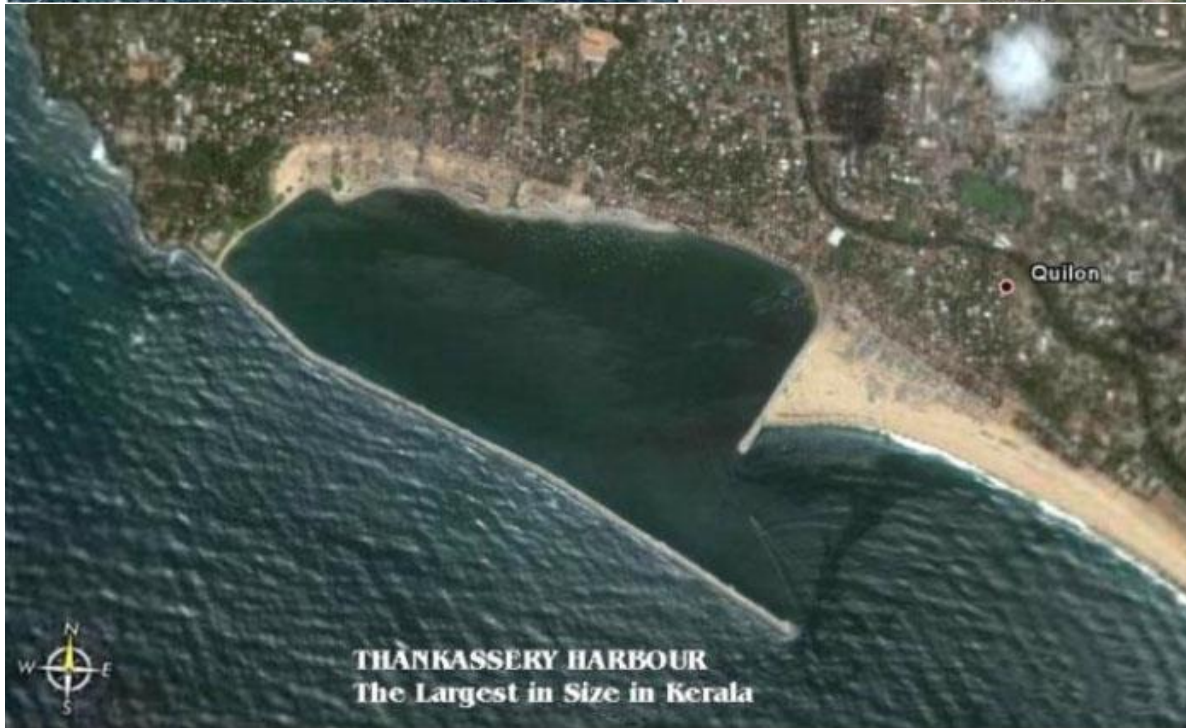


Diffrakciós mintázatok koherens fénnyel. (lézerekkel lehet jól látni)



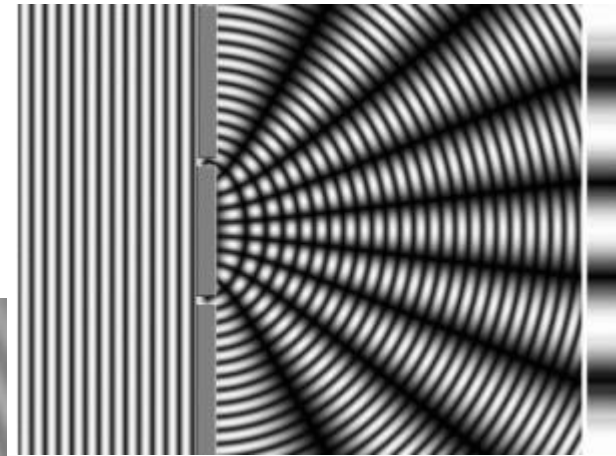
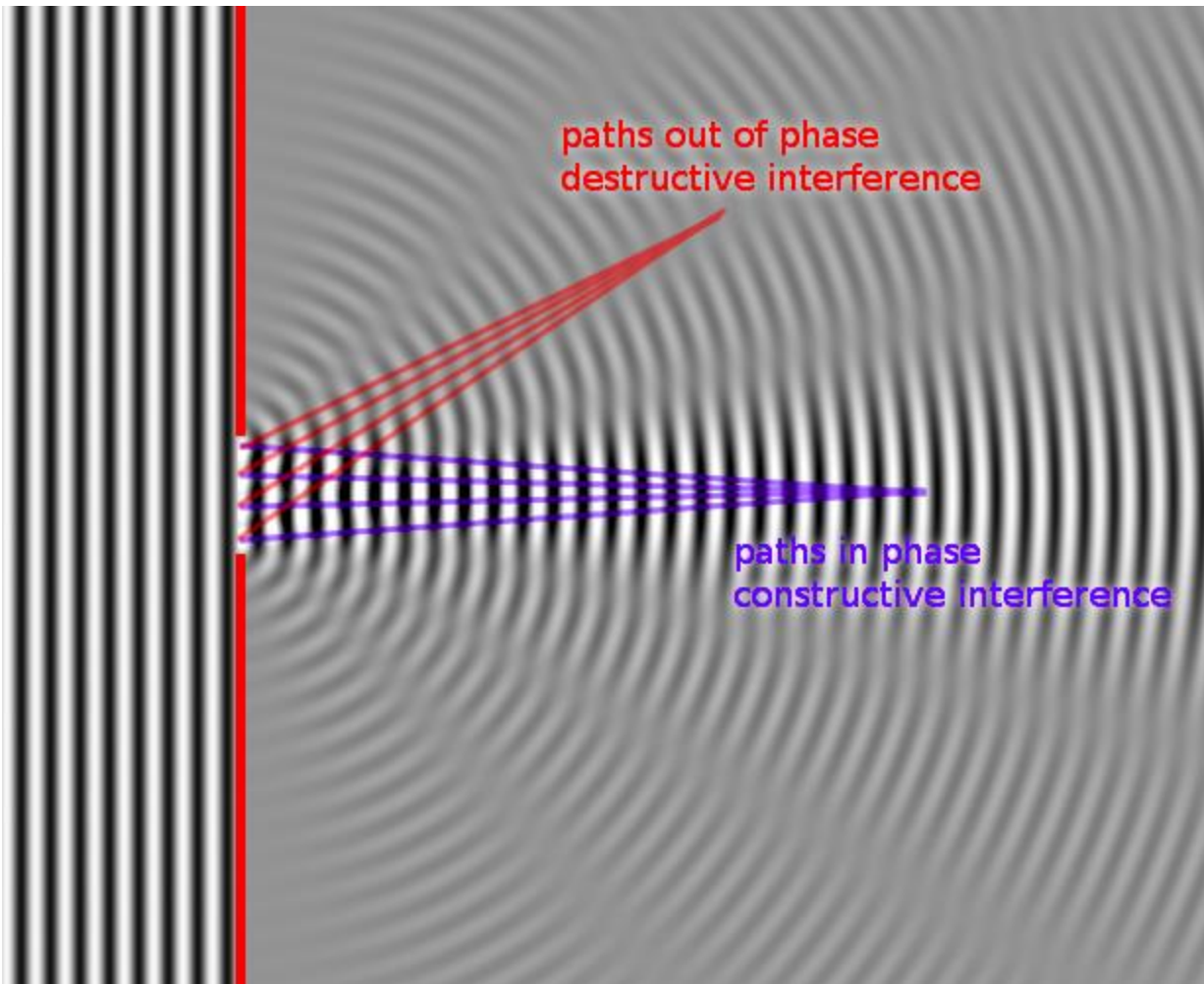
rtg diffrakció



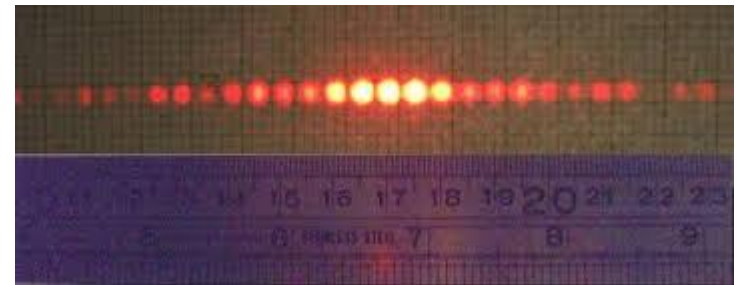
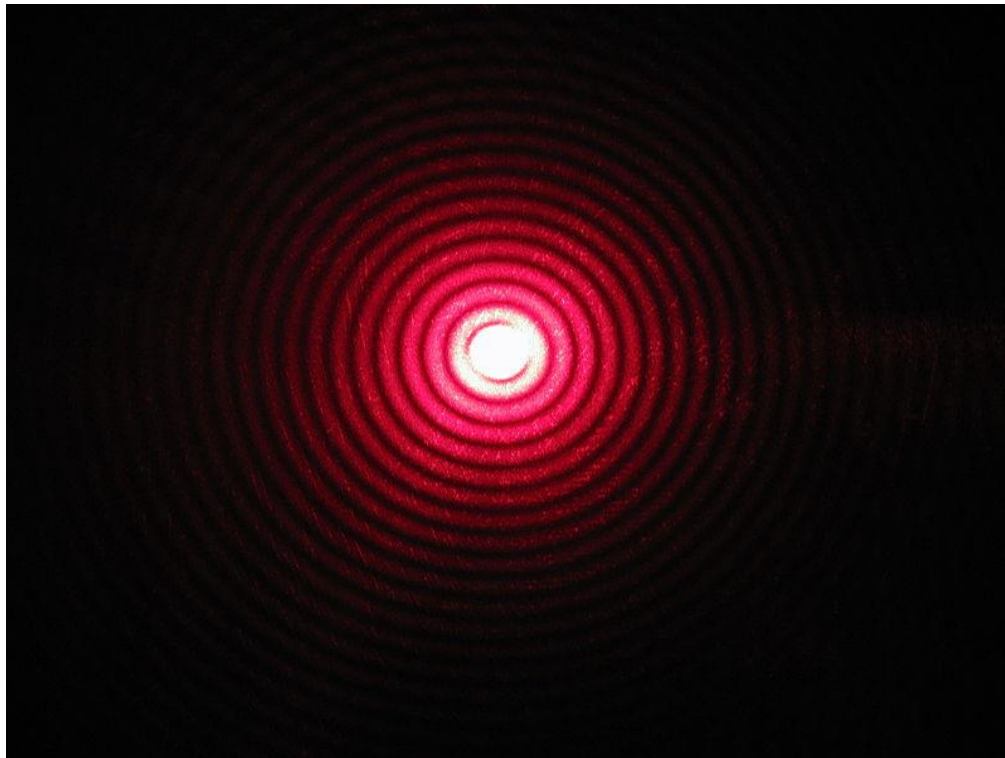
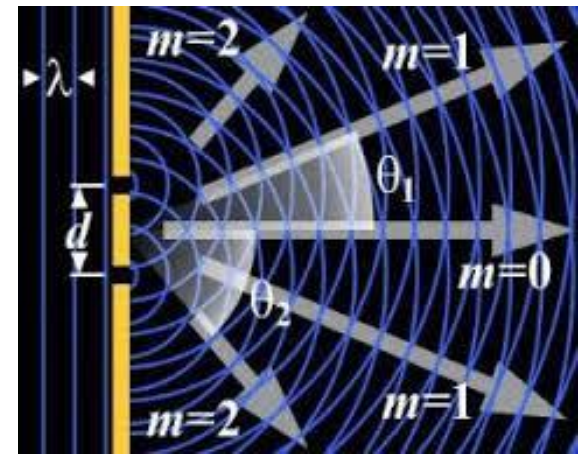
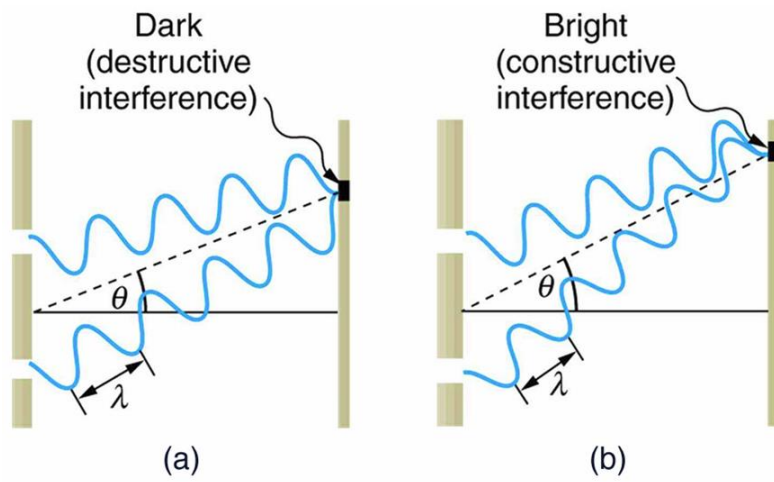


Diffrakció a vízen is előfordul...

To understand the patterns we need to calculate the phase for each wave at the screen.

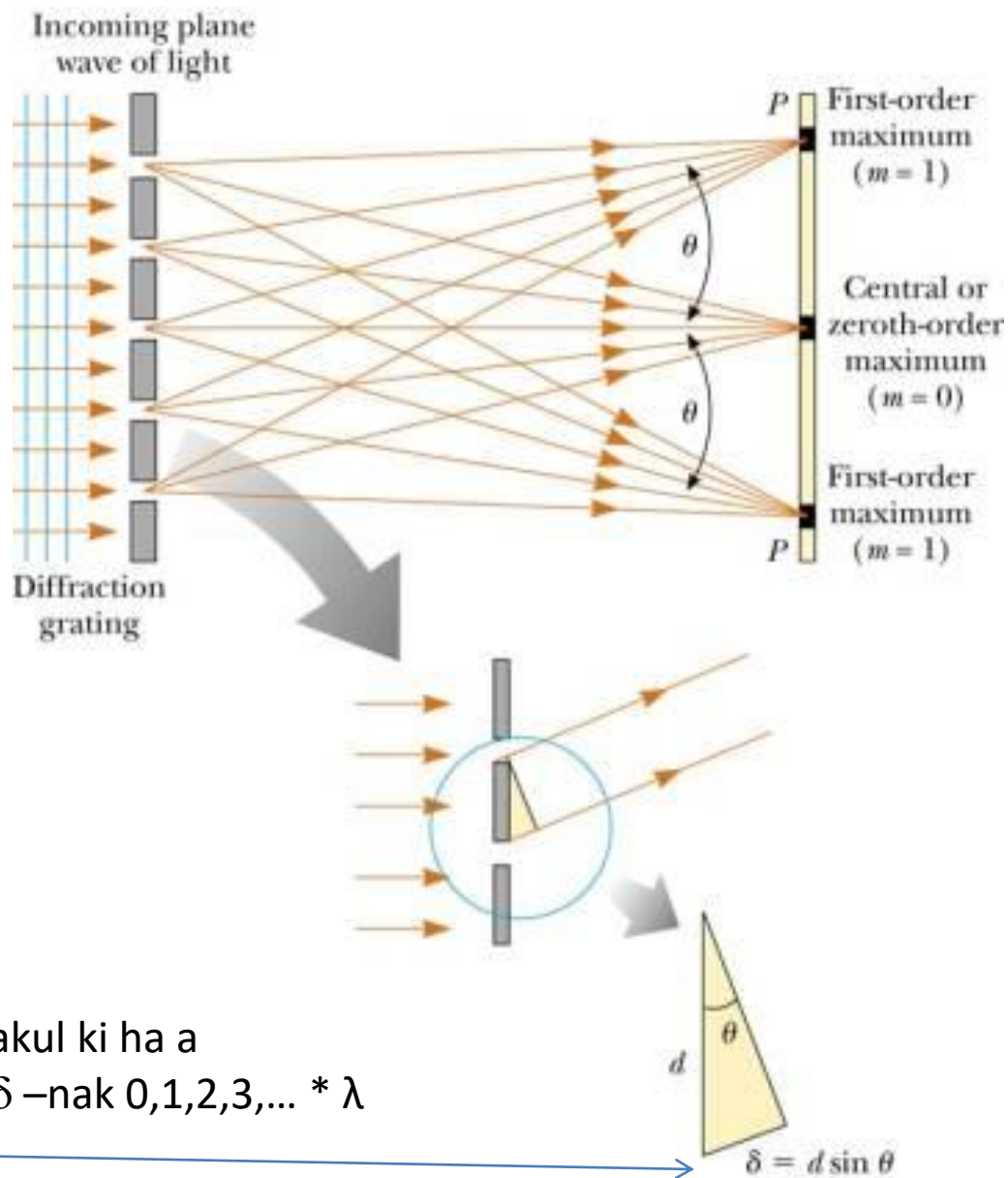






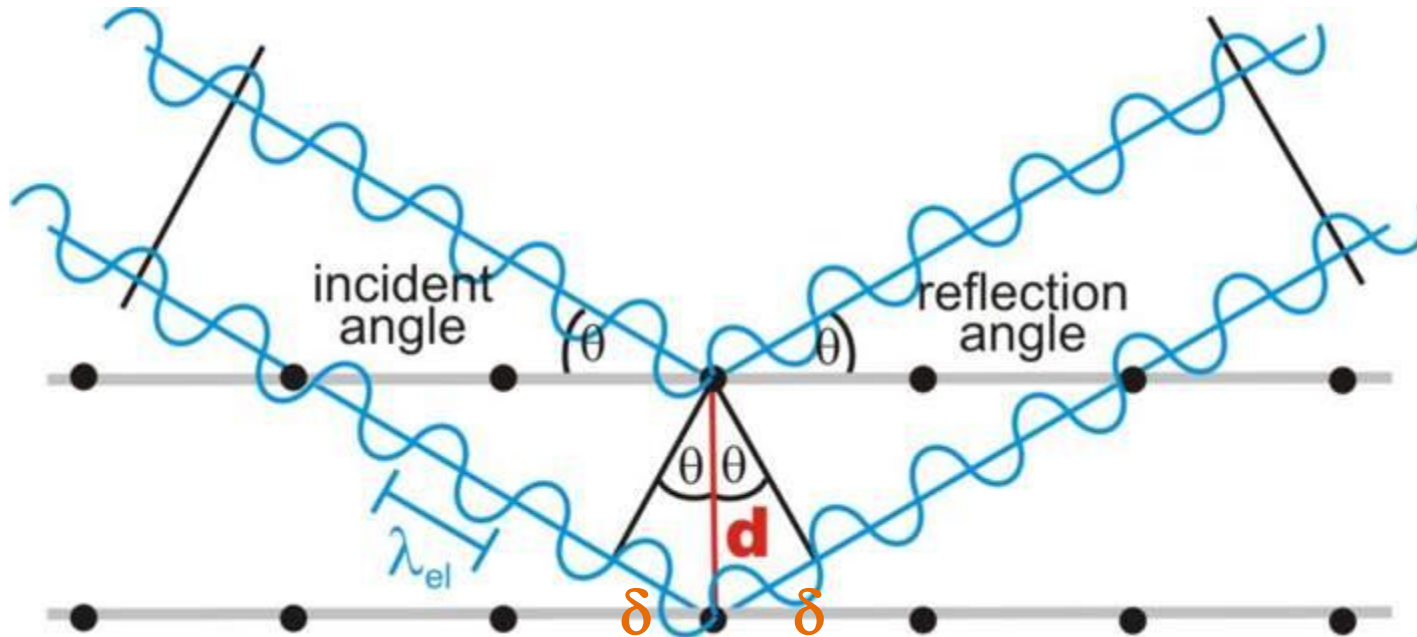


Elhajlás optikai rácson:



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

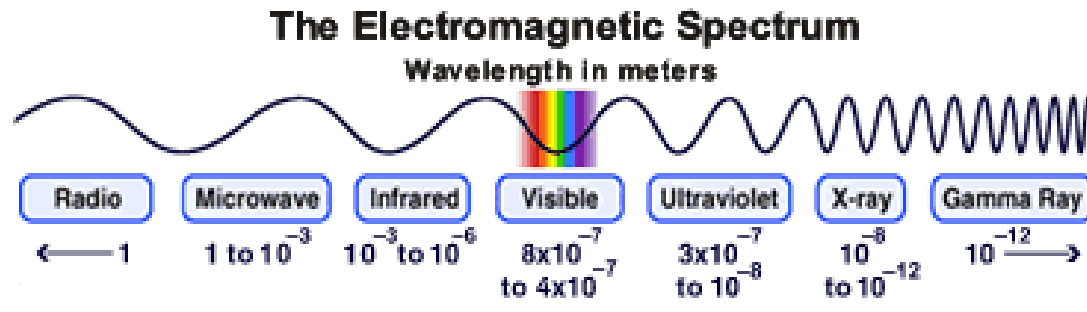
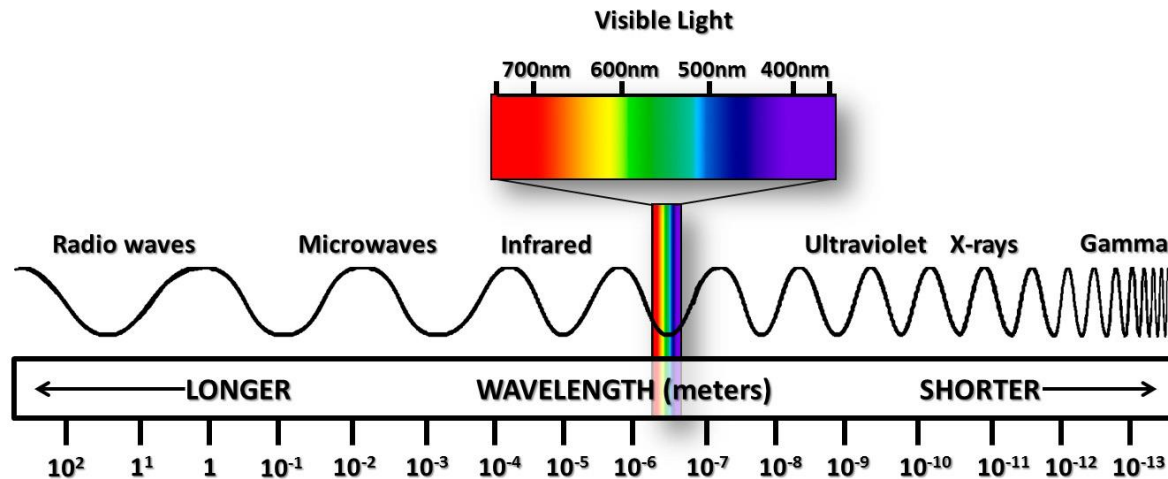
A reflexiós rácson az útkülönbség kétszer jelenik meg, így  $2\delta = \lambda$   
(vagy egész számú többszöröse)



Ha  $\lambda$  ismert, és a  $\theta$ -t mérjük akkor  $d$  meghatározható -> röntgendiffrakciós szerkezetmeghatározás

## Alkalmazás

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



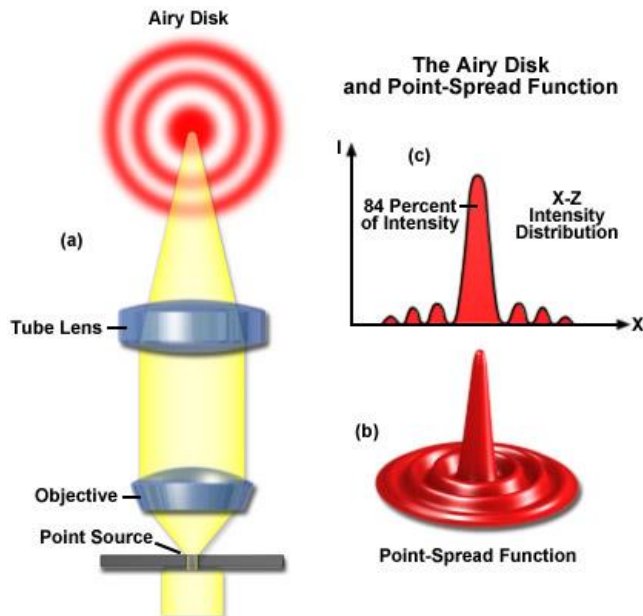
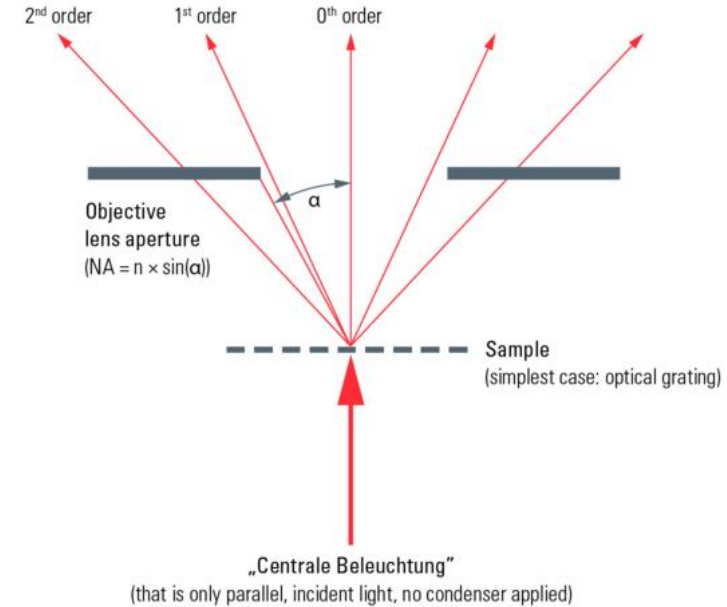
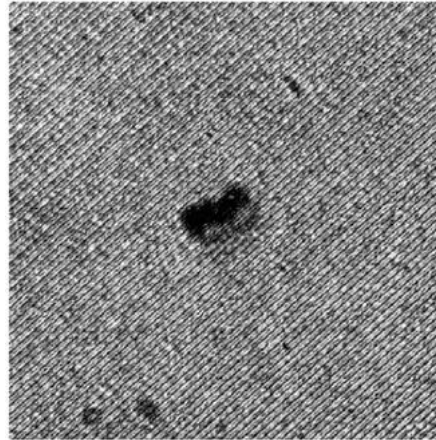
**About the size of:**



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

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

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

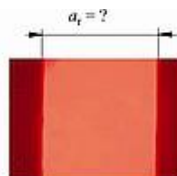
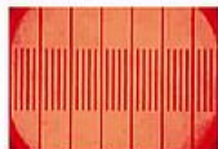


image of the  
"red" slit



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

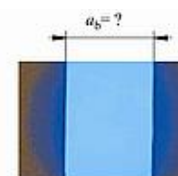
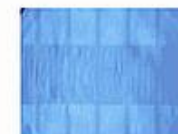
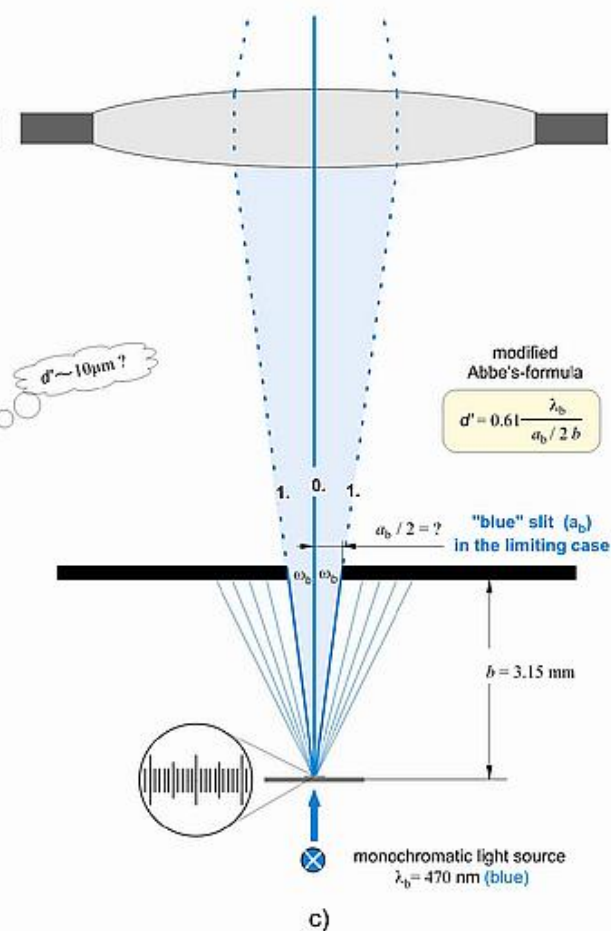
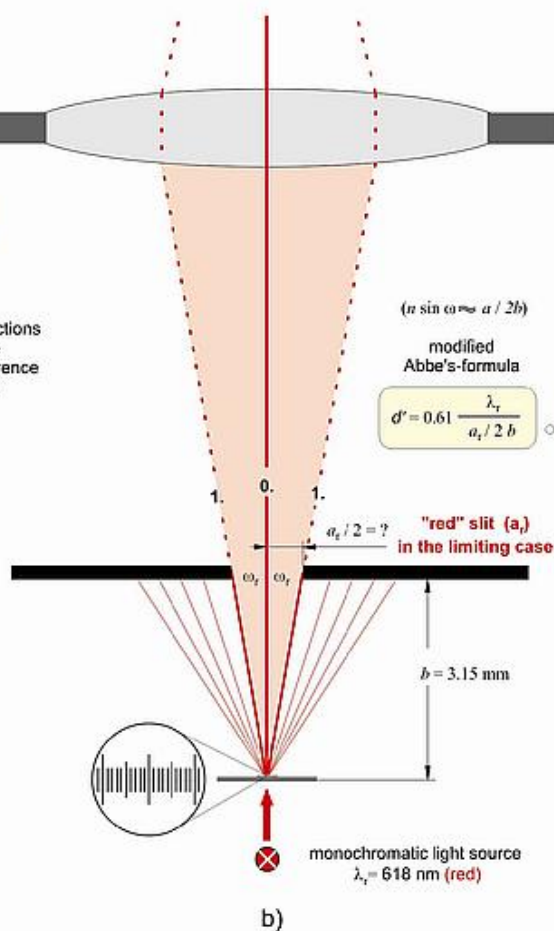
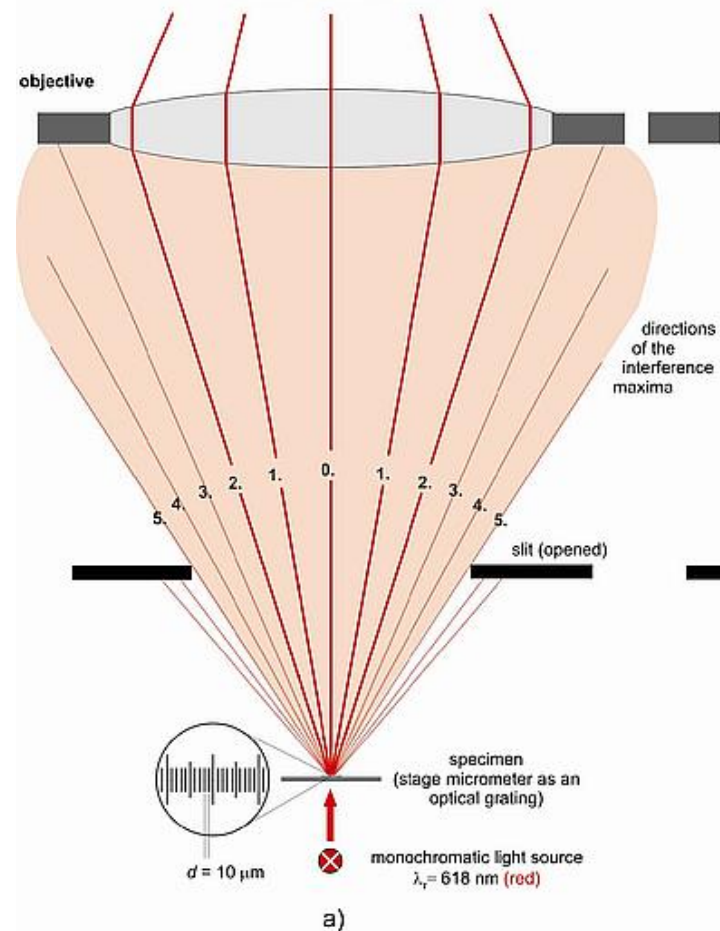


image of the  
"blue" slit



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

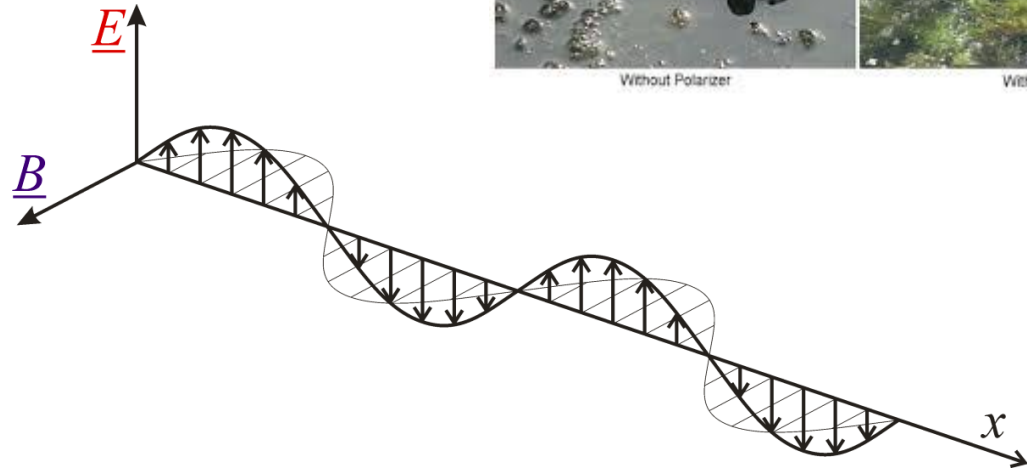




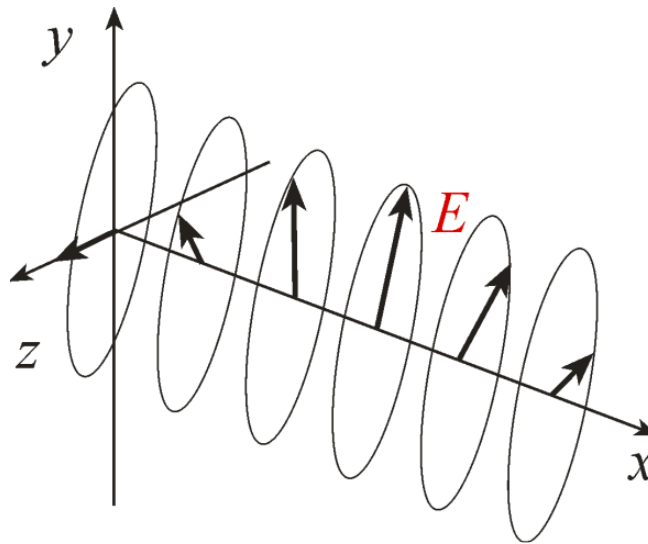
## Polarizáció



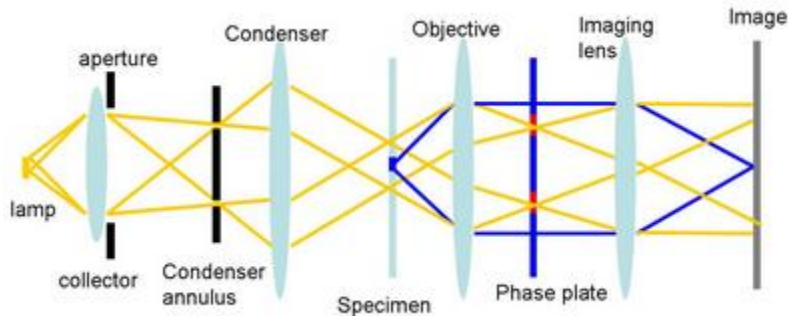
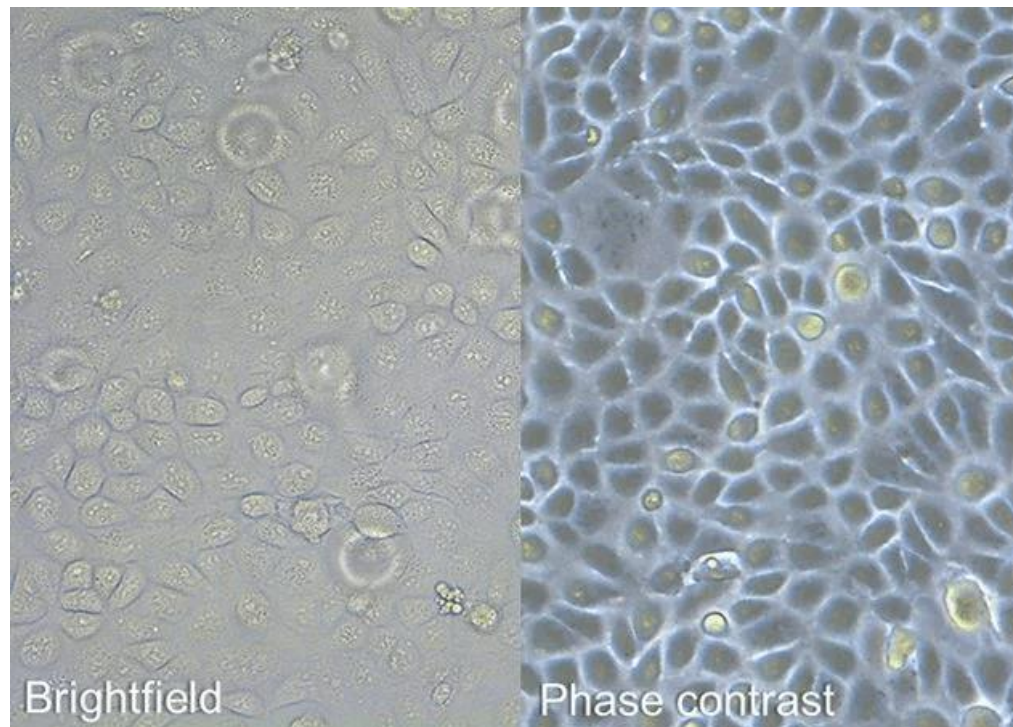
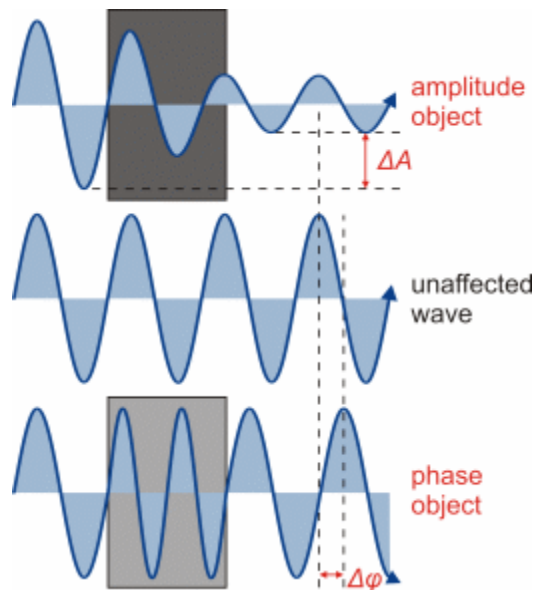
Lineárisan polarizált fény



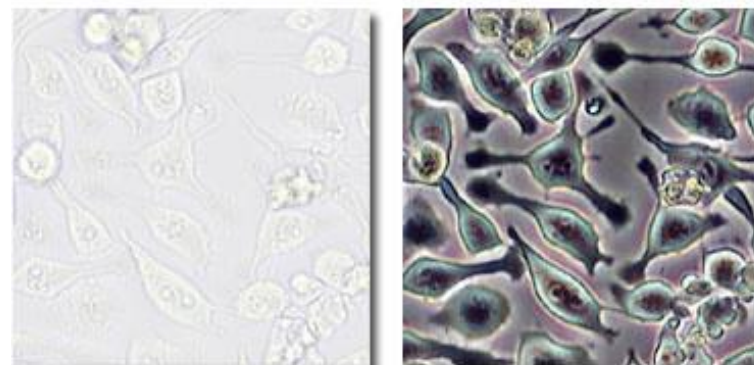
Cirkulárisan polarizált fény

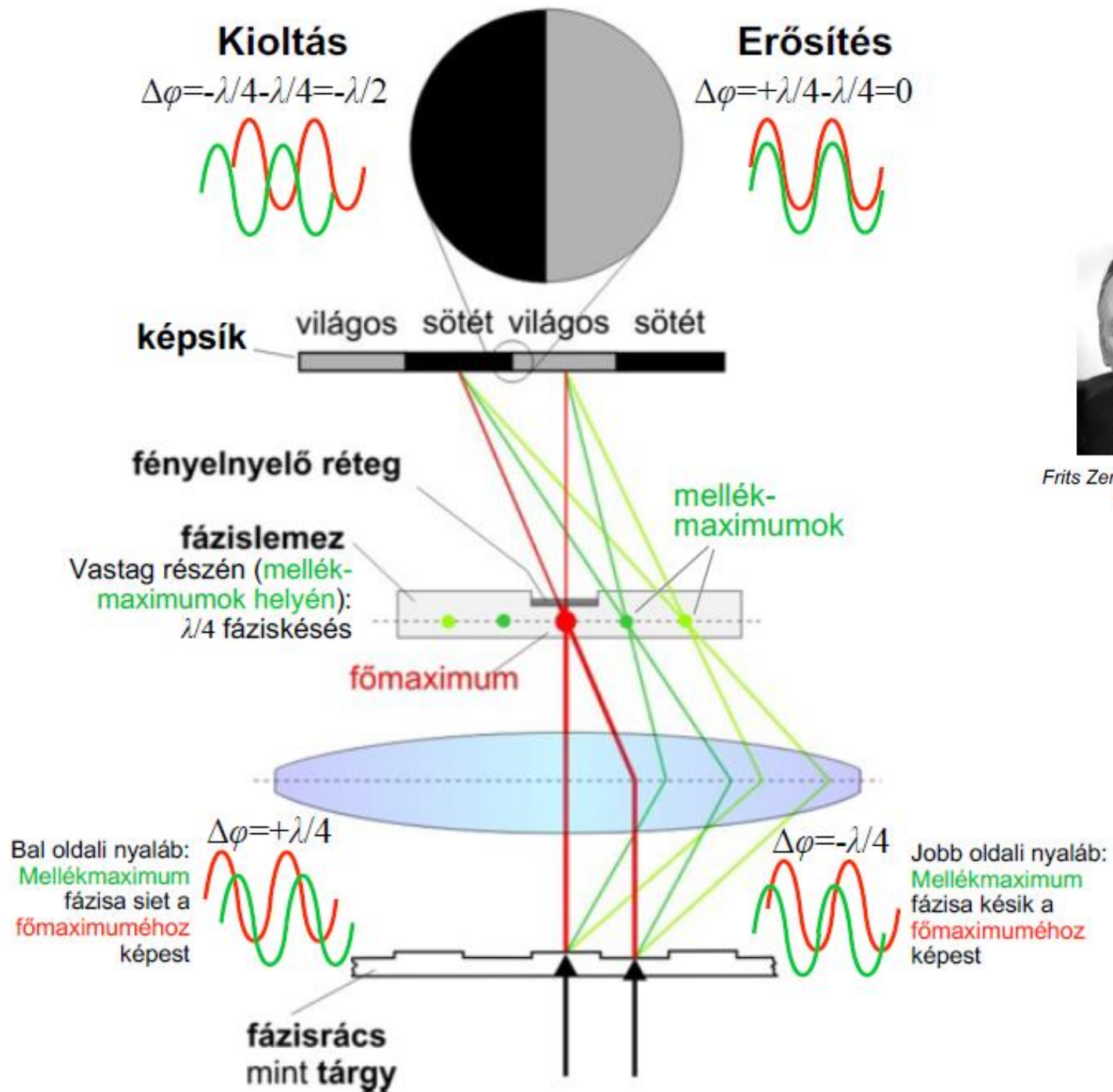


## Fáziskontraszt mikroszkópia



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.

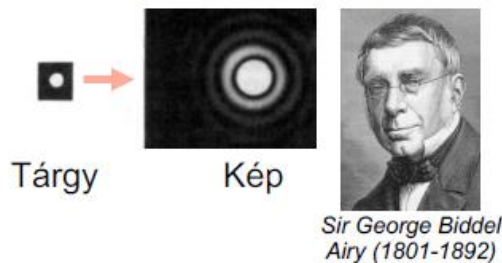




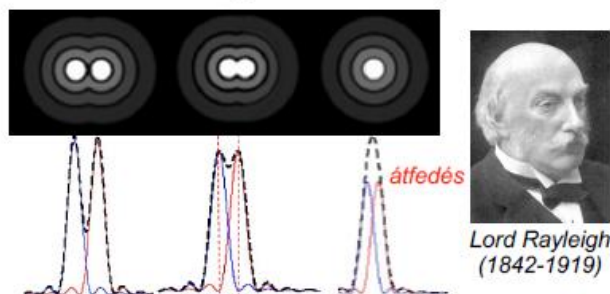
Frits Zernike (1888-1966)  
Nobel-díj



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



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



Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-képlet):

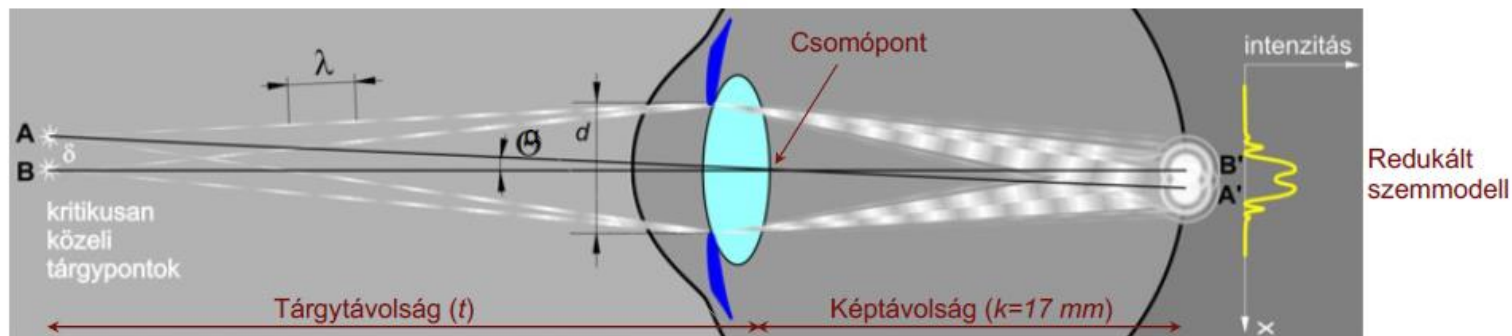
$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

$\lambda$  = hullámhossz  
 $n$  = közeg törésmutatója  
 $\alpha$  = 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

van amit a hullámtan sem tud teljesen megmagyarázni:

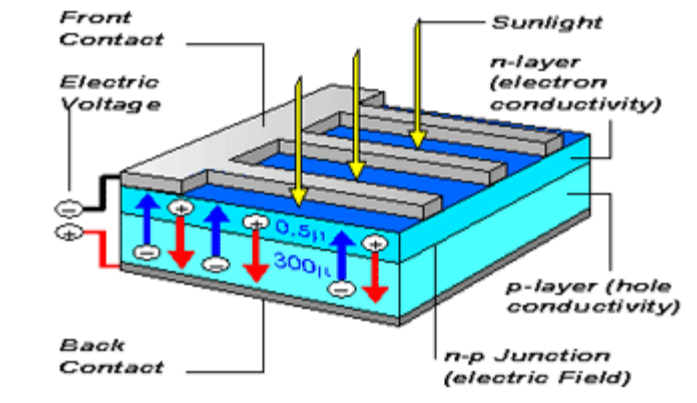
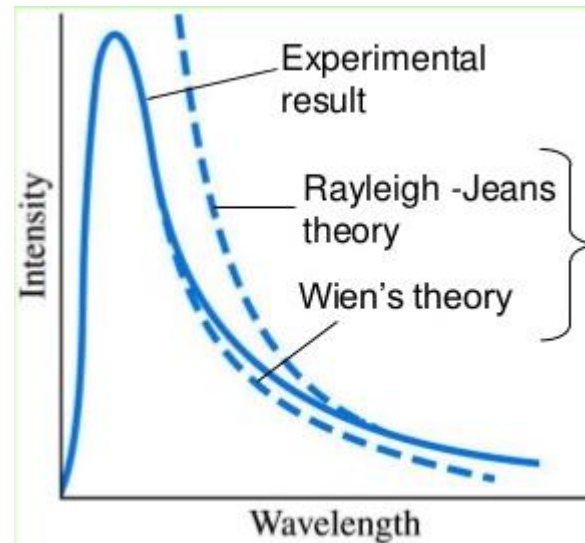
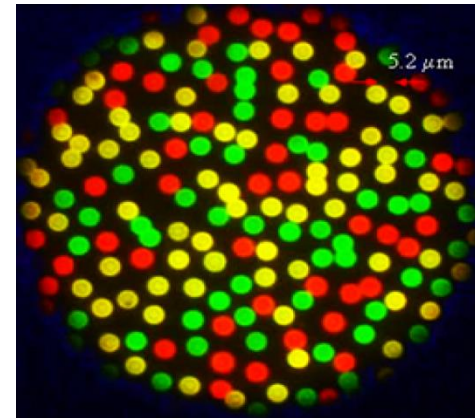
fényelektromos hatás

Kvantum pöttyök

fluoreszcencia

lézer

fekete test sugárzás



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

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

Feedback