

# HULLÁMOPTIKA

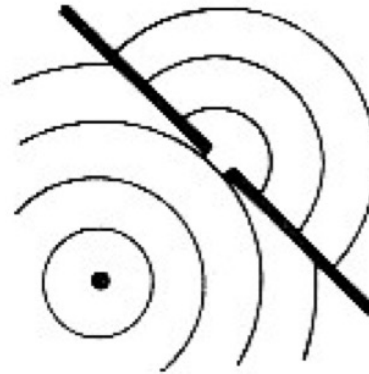
KELLERMAYER MIKLÓS

# Hullámoptika

---

Ha a fény a hullámhossznál kisebb vagy azzal összemérhető résen halad át, a hullámtermészetet figyelembe kell venni.

Bizonyos jelenségek  
nem magyarázhatók  
a geometriai  
optikával!



A fény mint hullám  
fontos paraméterei:

- **Periódusidő** ( $T$ )
- **Frekvencia** ( $f=1/T$ )
- **Terjedési sebesség** ( $v, c$ )
- **Hullámhossz** ( $\lambda$ ): egy  $T$  alatt megtett távolság:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

A fény terjedési sebessége **vákuumban**:  $c=2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

# A hullámok forrása: rezgőmozgás

Példa:  
Mechanikai  
rezgés

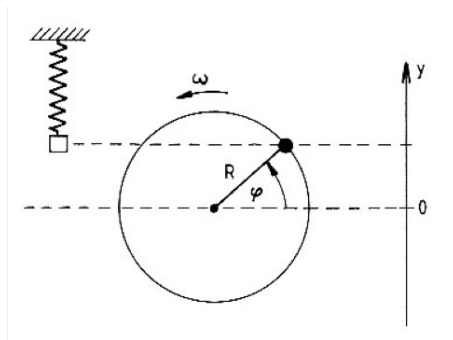


**Tacoma Narrows Bridge** (“Gallopín’ Gertie”; “Gertie the Dinosaur” (1914), rajzfilm alapján)

- Átadás: 1940. július 1.
- Szélben (50-70 km/h): órákon át tartó rezgés.
- Rezgés amplitudó eleinte 0,5 m, majd egy tartókábel elszakadása után akár 9 m!
- Összeomlás: 1940. november 7.

# Harmonikus rezgőmozgás

Egyensúlyi helyzetéből kitérített rendszerre visszatérítő erő hat (pl. rugóra függesztett tömeg).



$\phi$  = fázisszög  $t$  időpontban  
 $y$  = kitérés  $t$  időpontban  
 $\omega$  = szögsebesség ( $\phi/t = 2\pi/T$ ) =  
 körfrekvencia ( $2\pi f$ )  
 $R$  = forgó egységvektor hossza =  
 maximális kitérés (amplitudó)

$$y = R \sin \phi$$

Mivel  $\phi = \omega t$ :

$$y = R \sin(\omega t)$$

Ha a kiindulási fázis-  
szög ( $\phi_0$ ) nem zérus:

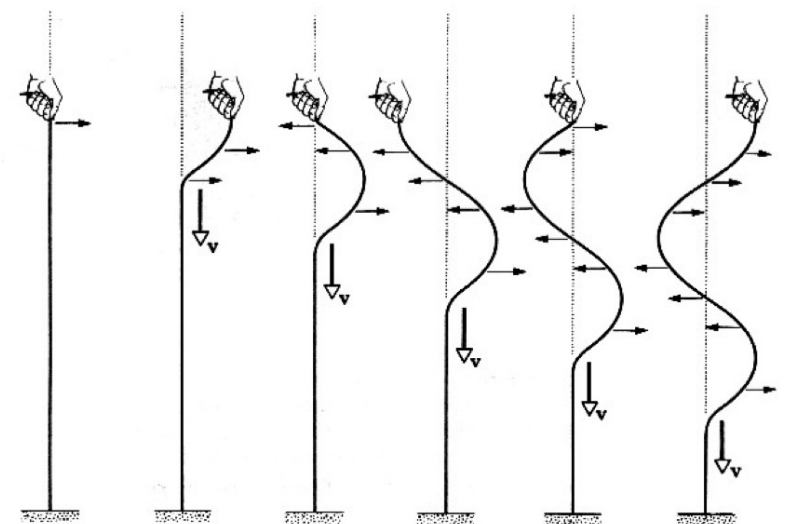
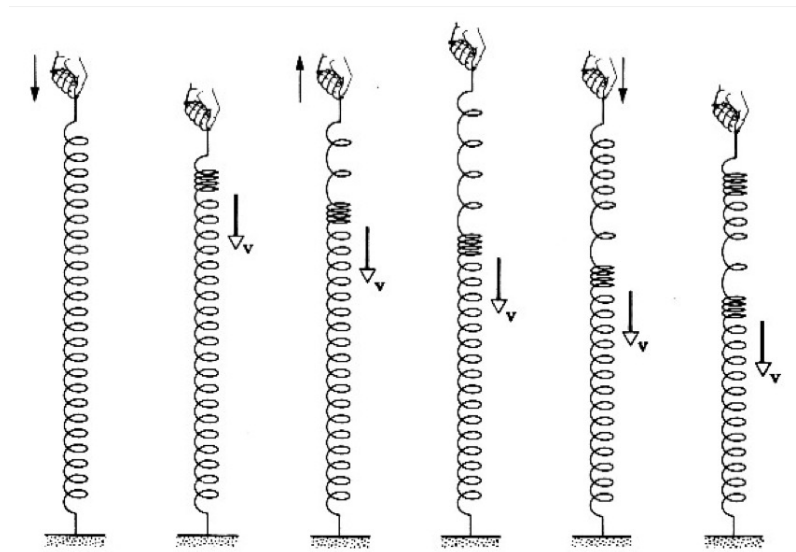
$$y = R \sin(\omega t + \phi_0)$$

Mivel a szögsebesség ( $\omega$ ) a  
periódusidő ( $T$ ) alatt megtett  
teljes kör ( $2\pi$ ):

$$y = R \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi_0\right)$$

# Hullámok típusai

- 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)





# Hullámjelenségek I.

## Diffrakció, hullámelhajlás

Huygens-Fresnel elv:  
egy hullámfront minden pontja további hullámok forrása

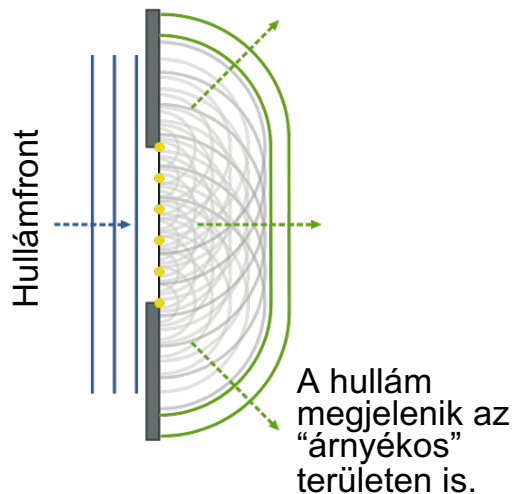
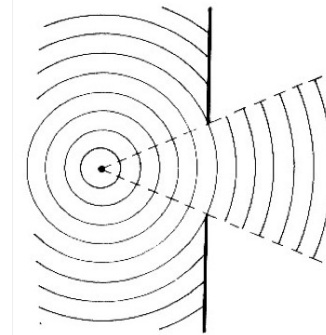


Christiaan Huygens  
(1629-1695)

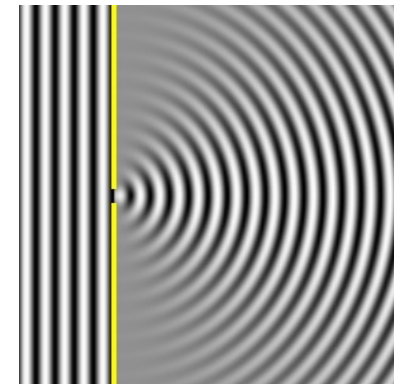
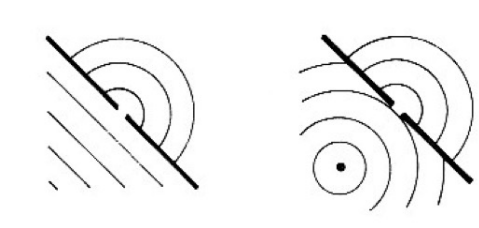


Augustin-Jean Fresnel  
(1788-1827)

Hullámhossznál  
sokkal nagyobb rés



Hullámhossznál  
kisebb rés



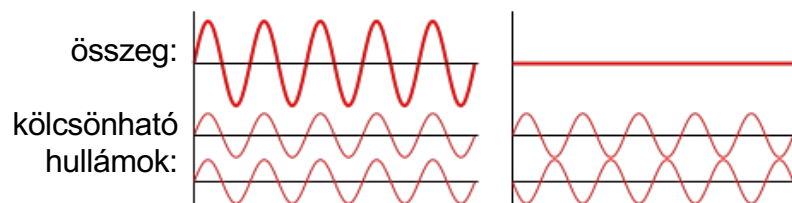
# Hullámjelenségek II.

## Interferencia

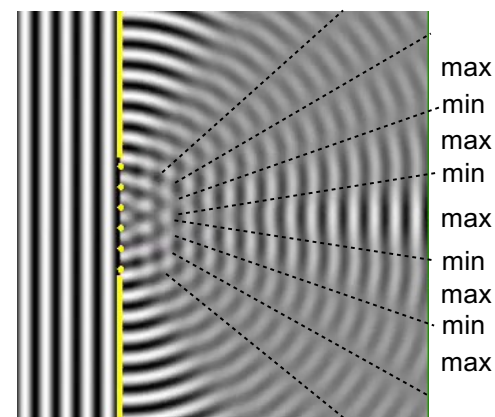
### Alapja: szuperpozíció elve

Hullámok fázisban  
( $\Delta\varphi=0$ ): erősítés

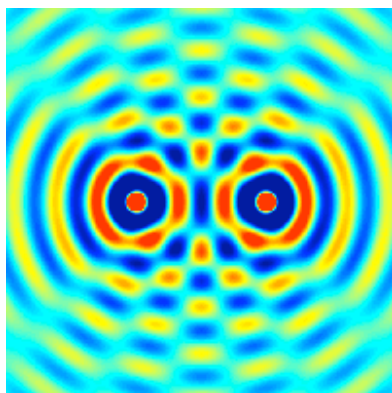
Ha  $\Delta\varphi=\pi$   
: kioltás



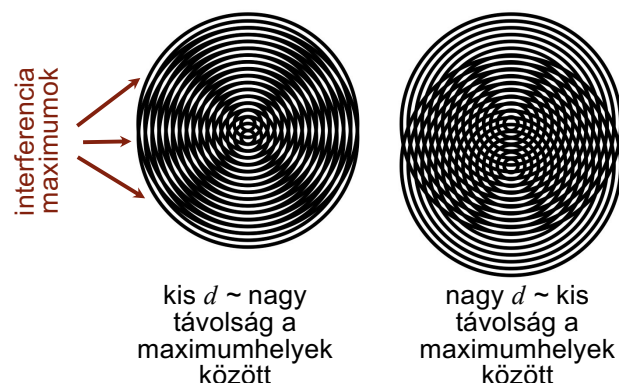
Több ( $>1$ ), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés  
( $=d$  távolságra levő pontszerű rések, ahol  $d \sim \lambda$ )



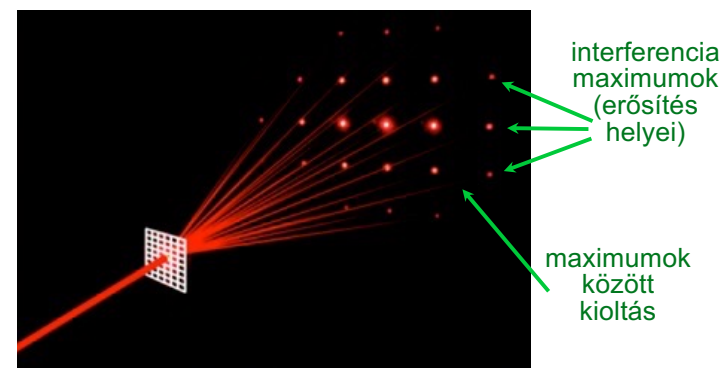
Két, pontszerű forrásból  
származó hullámok  
interferenciája



Kialakuló **interferencia  
mintázat** a pontszerű rések  
közötti távolságtól ( $d$ ) függ



2D optikai rács elhajlási  
(diffrakciós) interferencia képe

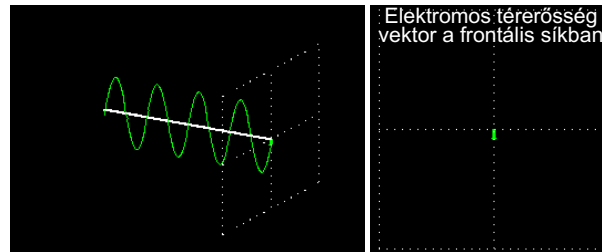
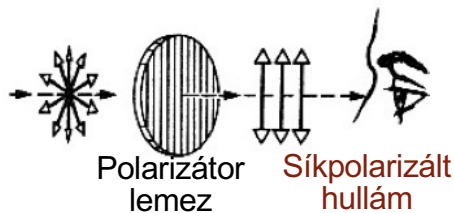


# Hullámjelenségek III.

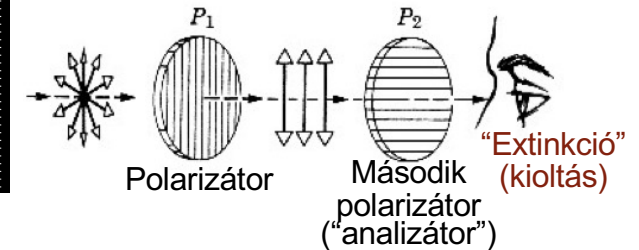
## Polarizáció: kitüntetett irányú rezgés

Csak a **transzverzális** hullámok polarizálhatók.

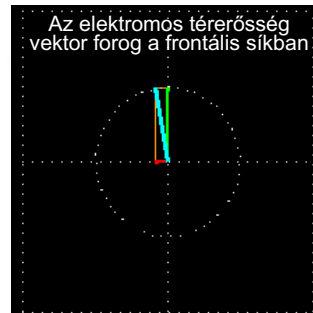
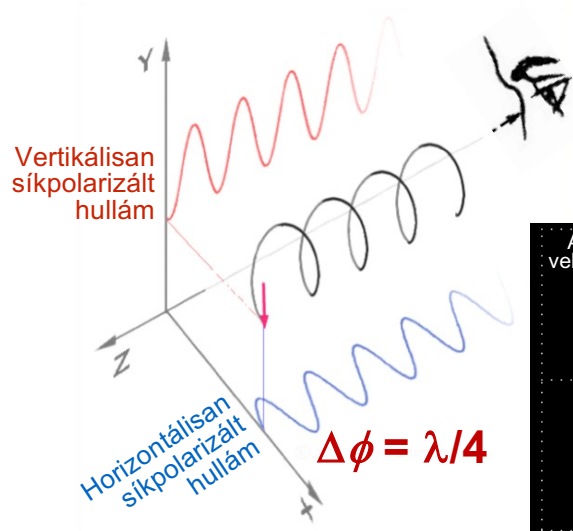
**Sík- vagy lineáris polarizáció**



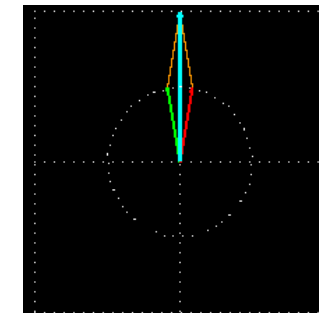
A síkpolarizált fény kielhatható keresztállású polarizátorral



**Cirkuláris polarizáció**



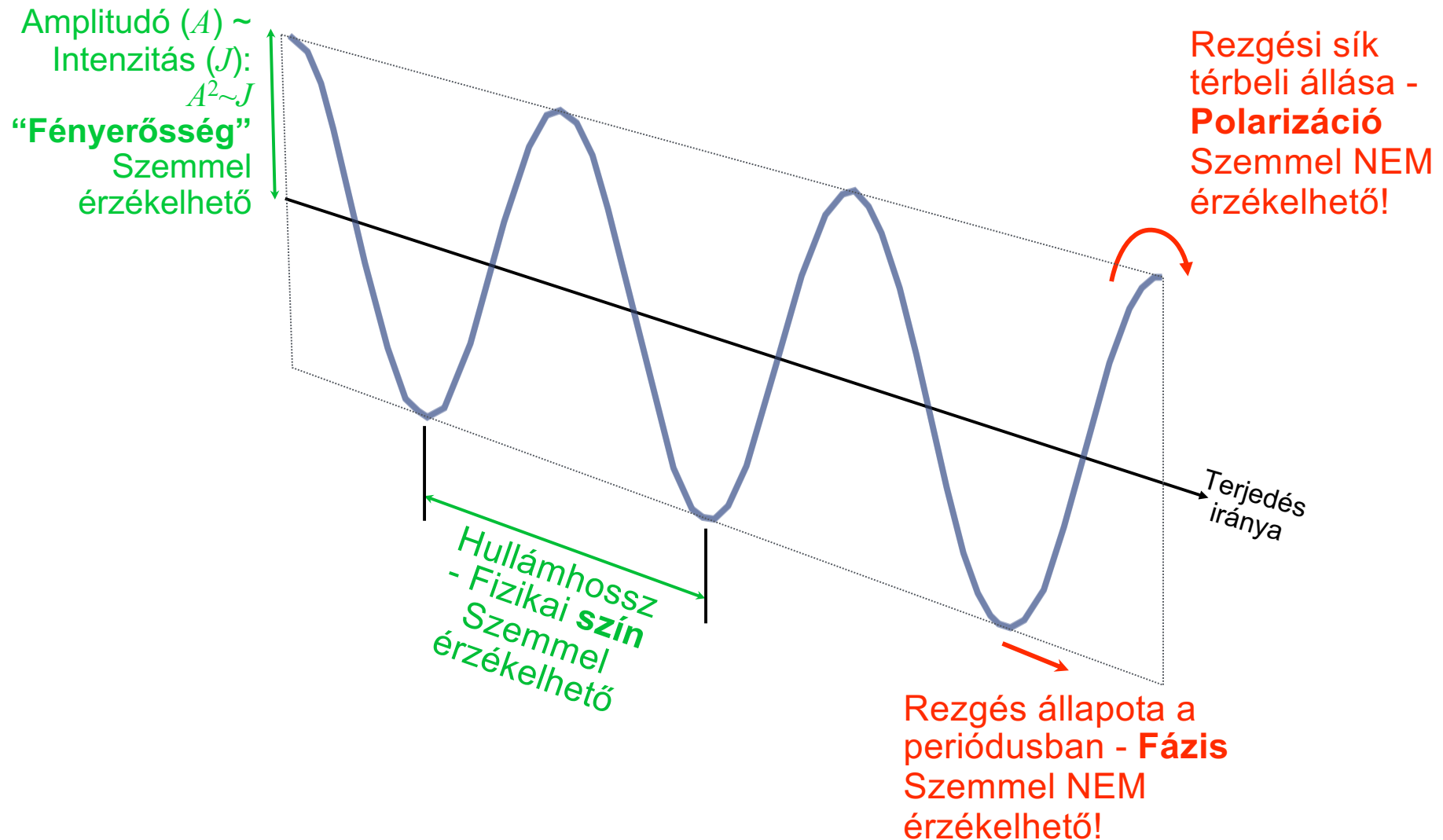
**N.B.: Síkpolarizált fény — jobbra és balra cirkulárisan polarizált fény összege**



$(\Delta\phi = 0)$

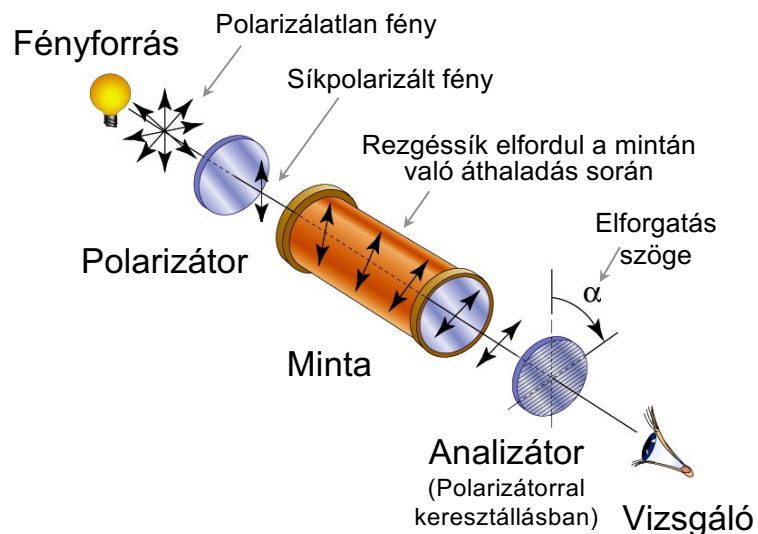


# A fény mint hullám közvetlenül érzékelhető paraméterei



# Polarizáció alkalmazásai

## Polarimetria



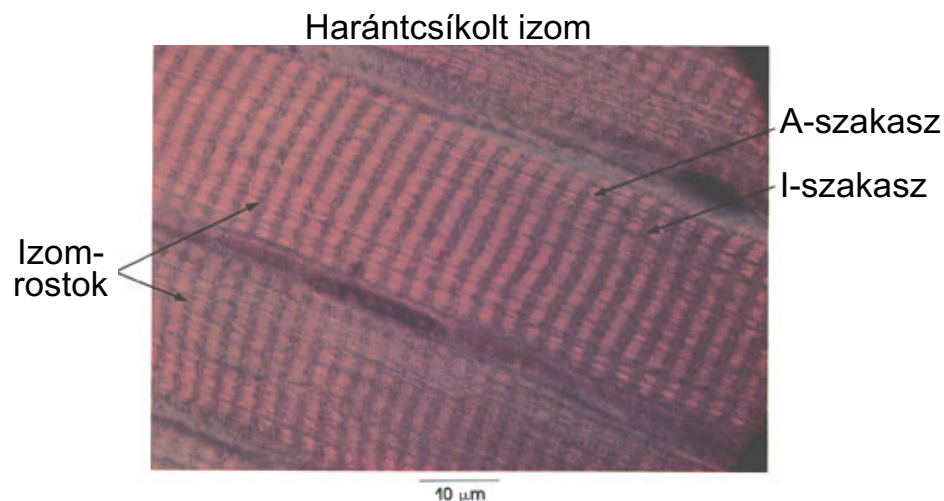
Elforgatás szöge az optikailag aktív\* anyag koncentrációjától ( $c$ ) függ:

$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

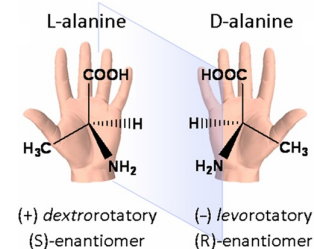
$[\alpha]$  = fajlagos forgatóképesség ("20": szobahő;  
"D": Na spektrális vonala  $\lambda=589$  nm)  
 $l$  = rétegvastagság (mintatartó hossza)

\*Optikailag aktív anyag: **királis** molekulákat tartalmazó minta, amely a síkpolárizált fény rezgéssíkját elforgatja.

## Polarizációs mikroszkópia



- A-szakasz: anizotróp (kettőtörő) szakasz (rendezett miozinmolekulákat tartalmaz)
- I-szakasz: izotróp szakasz



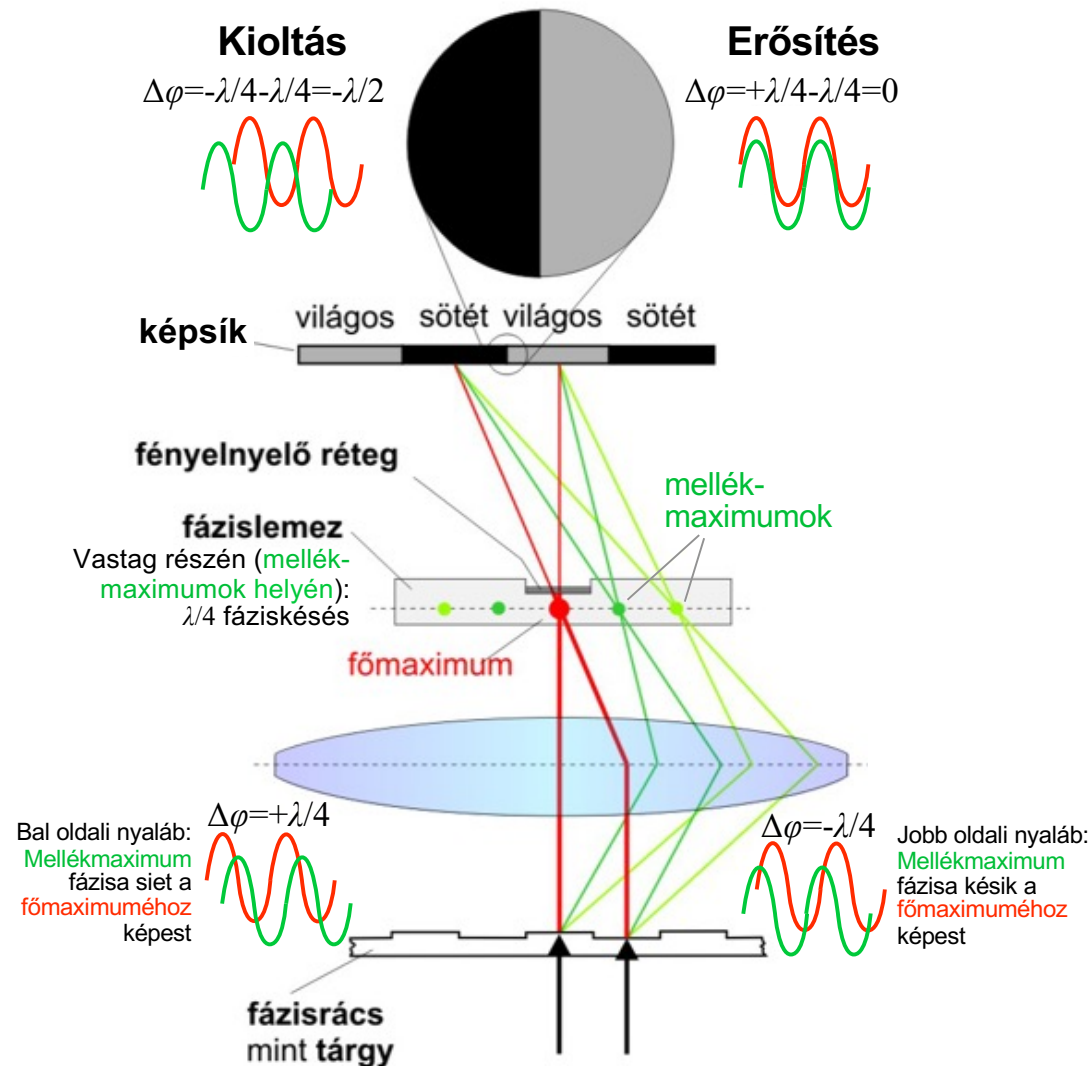
# Fáziskontraszt mikroszkópia

A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitudó kontraszttá alakítja

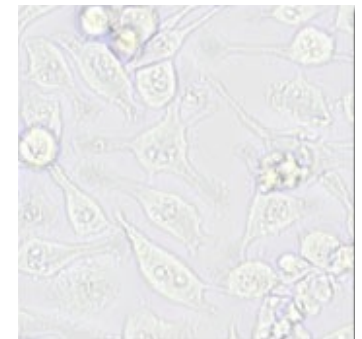


Frits Zernike (1888-1966)  
Nobel-díj

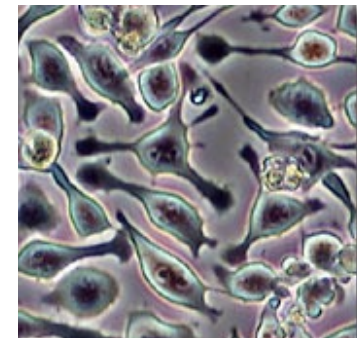
- Fázis: azt mutatja meg, hogy a teljes hullámmozgási periódus ( $2\pi$ ) mely részén tart a rezgés.
- Fázisszöggel ( $\varphi$ ) fejezzük ki.
- Hullámok egymáshoz viszonyított fáziskülönbsége ( $\Delta\varphi$ ): fáziseltolódás (késés v. sietés)



Élő (festetlen) sejtek  
mikroszkópos képe



Világos látóterű  
mikroszkóp

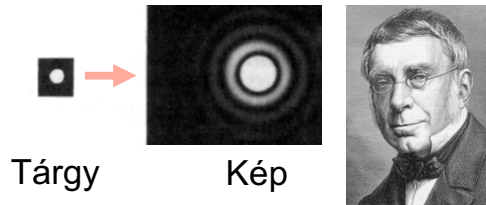


Fáziskontraszt  
mikroszkóp

# A szem feloldóképesége I.

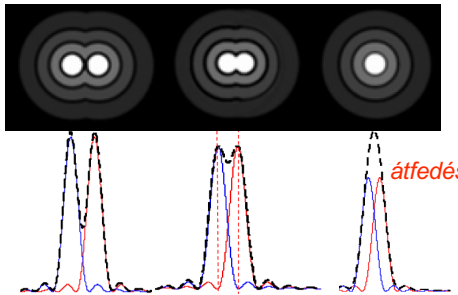
## Hullámoptikai korlát

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 képeik között



Lord Rayleigh (1842-1919)

Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-képlet):

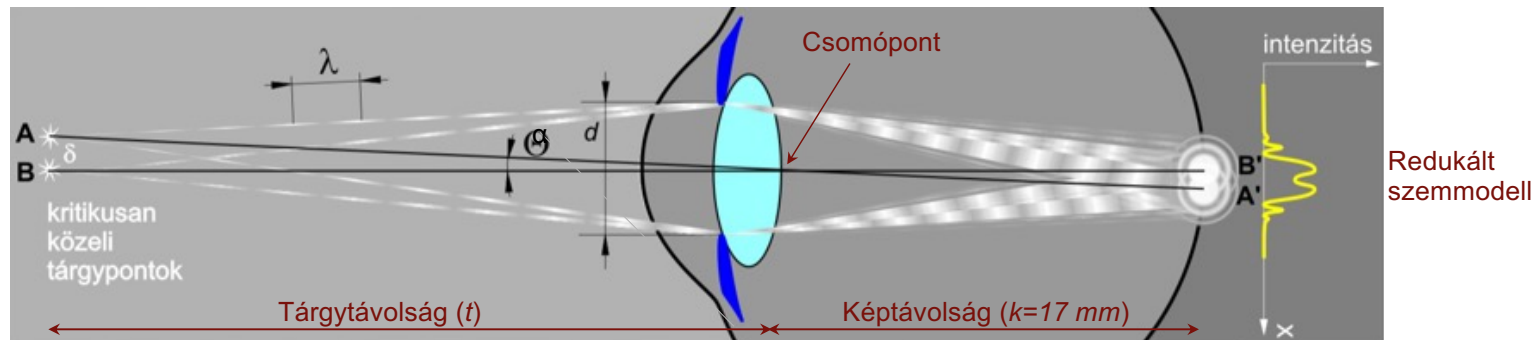
$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

$\lambda$  = hullámhossz  
 $n$  = közeg törésmutatója  
 $\alpha$  = optikai tengely és legszélső nyaláb által bezárt szög (félnyílásszög)



Ernst Abbe (1840-1905)

Az emberi szem hullámoptikai feloldóképesége:



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)

# A szem feloldóképesége II.

## Biológiai korlát: receptorsejt-sűrűség

Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet

- Feloldás feltétele: legalább egy inaktivált receptorsejt legyen két aktivált receptorsejt között. Ekkor a legkisebb látószöghatár a redukált szemmodell alapján ( $\alpha_B$ )  $\approx 0.8'$ .
- Az emberi szemben a hullámoptikai és biológiai feloldóképeség értékei nagyjából egybeesnek.

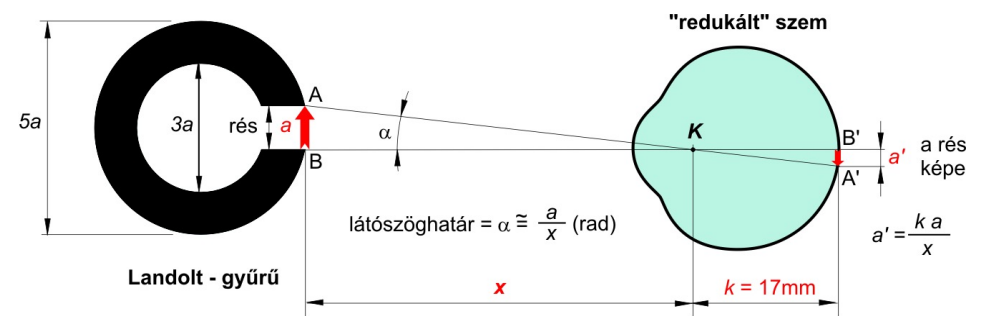
Látásélesség (*visus*, “Visual Acuity”, VA):

$$\text{látásélesség} = \frac{1'}{\alpha} 100\%$$

$\alpha$  = kísérleti (mért) látószöghatár

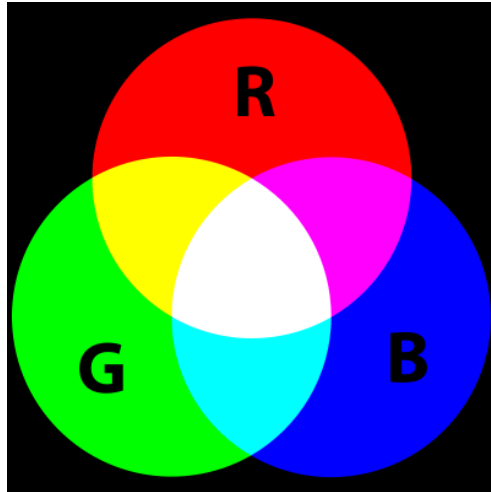
Normál látószöghatár egészséges emberben:  $1'$  (=100% *visus*)

Látásélesség mérése





# Színkódolás, színlátás



## Additív színkódolás

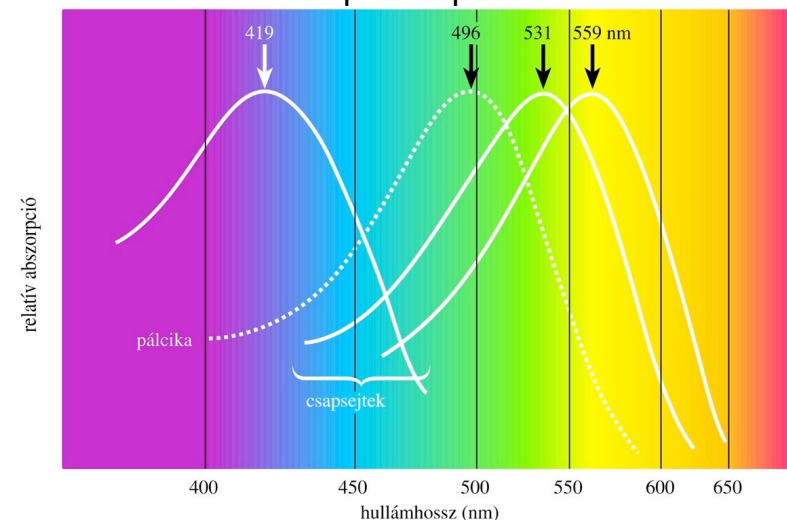
Bármely szín kikeverhető a három alapszín ( $R$ =vörös,  $G$ =zöld,  $B$ =kék) megfelelő súlyozású összekeverésével

$$X = rR + gG + bB$$

### Emberi szemben:

- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ( $R=64\%$ ,  $G=32\%$ ,  $B=2\%$ ).

Emberi szem színérzékeny receptorainak (csapok) abszorpciós spektrumai



# OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=OSHUE726ECORRL31>