

Hullámoptika

Orvosi Biofizika I. 2026. szeptember 22.

Kellermayer Miklós

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

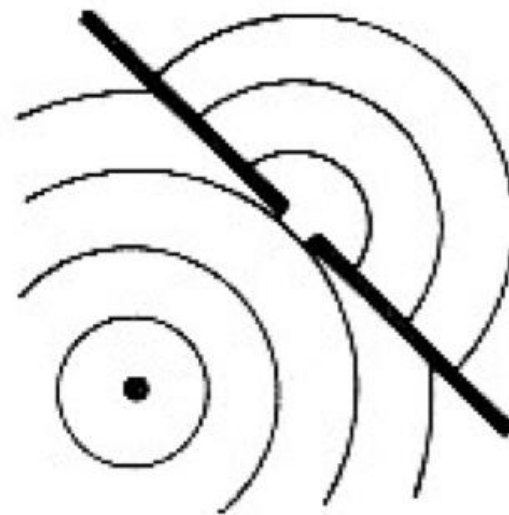


SEMMELWEIS
EGYETEM 1769

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** (λ): 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

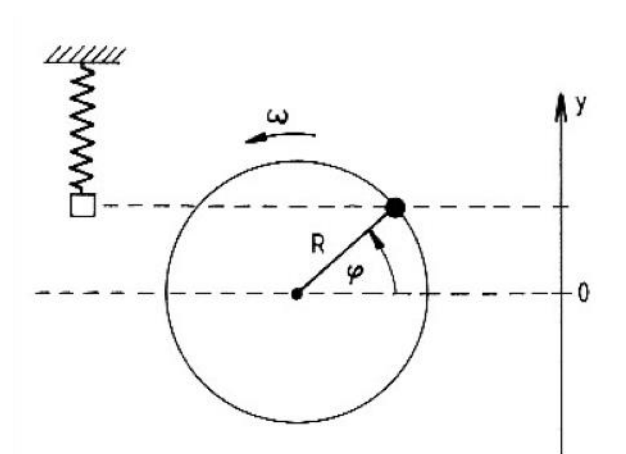


Tacoma Narrows Bridge (“Gallopín’ Gertie”; “Gertie the Dinosaur” (1914), rajzfilm alapján)

- 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).



ϕ = fázisszög t időpontban
 y = kitérés t időpontban
 ω = 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 (ϕ_0) nem zérus:

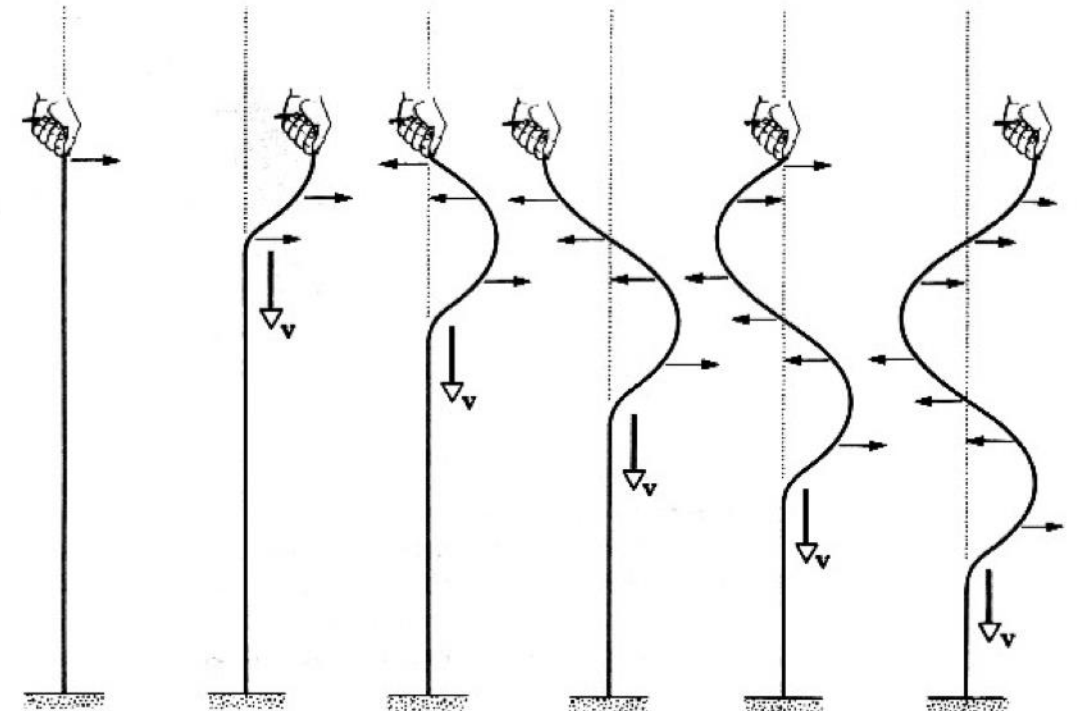
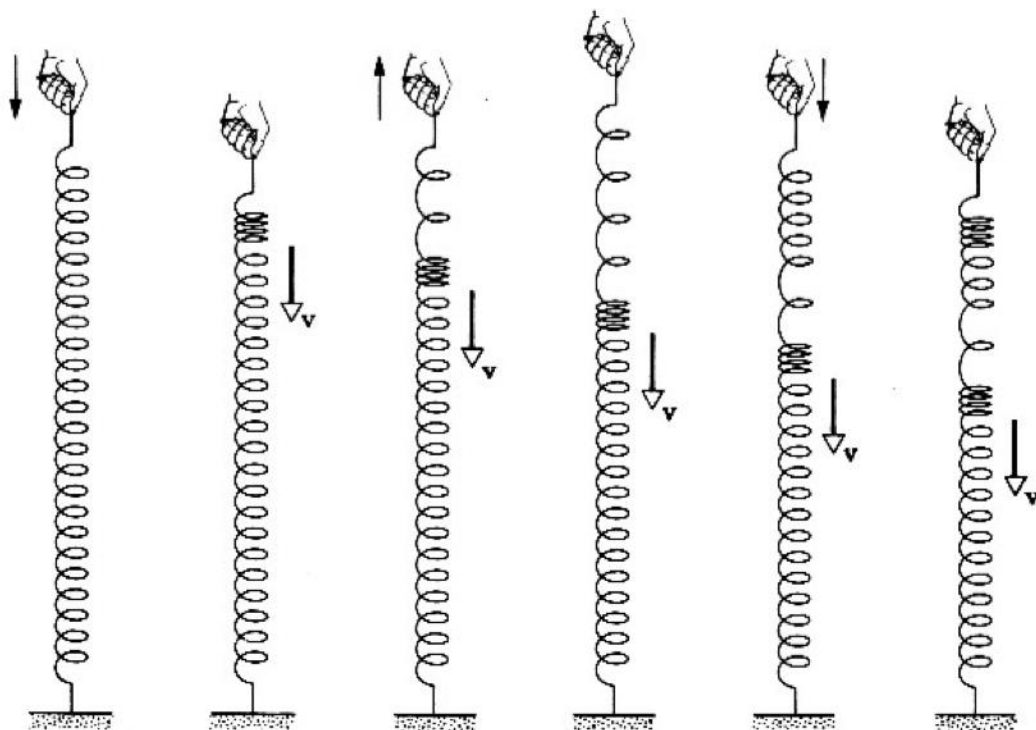
$$y = R \sin(\omega t + \phi_0)$$

Mivel a szögsebesség (ω) a
periódusidő (T) alatt megtett
teljes kör (2π):

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

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

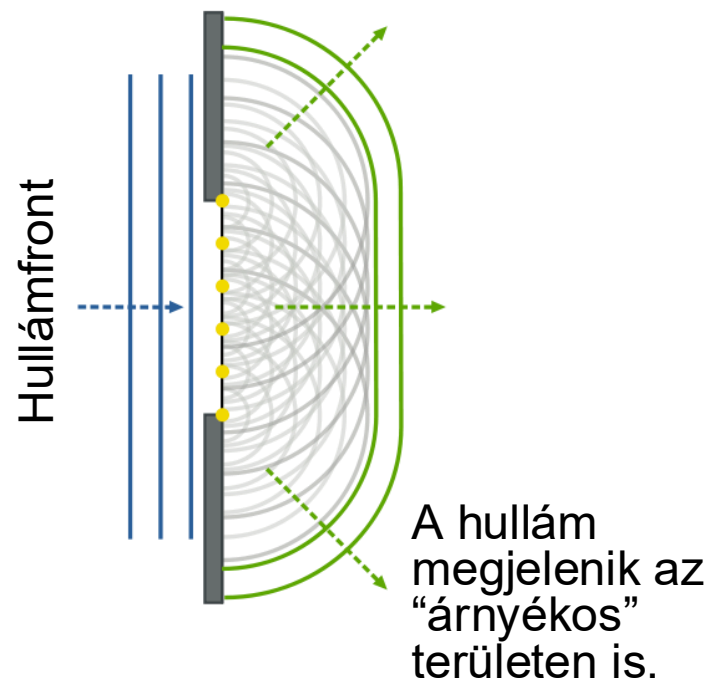
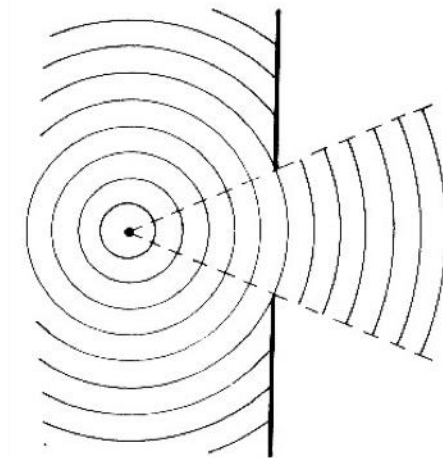


Christiaan Huygens
(1629-1695)

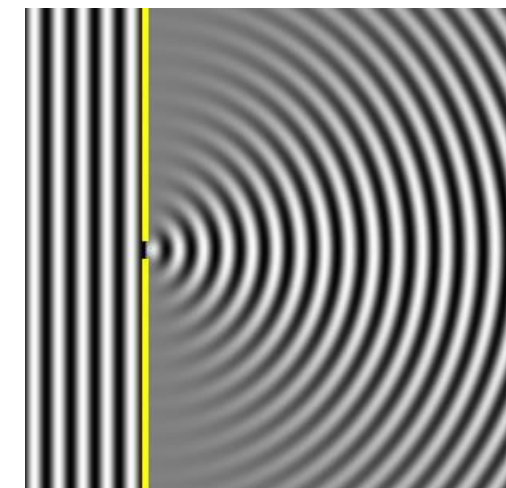
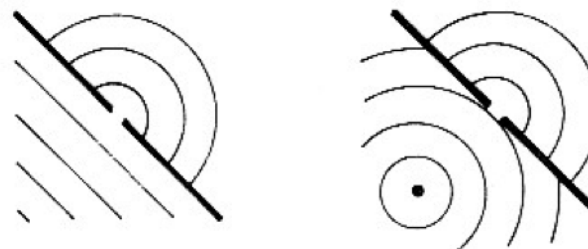


Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)

Hullámhossznál
sokkal nagyobb rés



Hullámhossznál
kisebb rés



Hullámjelenségek II.

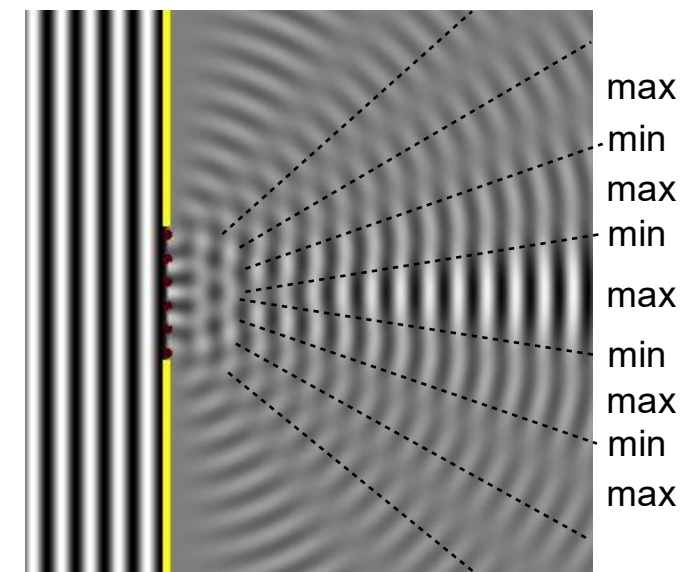
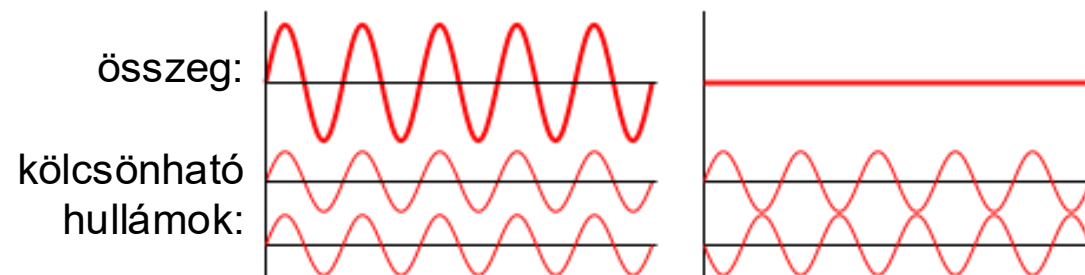
Interferencia

Alapja: szuperpozíció elve

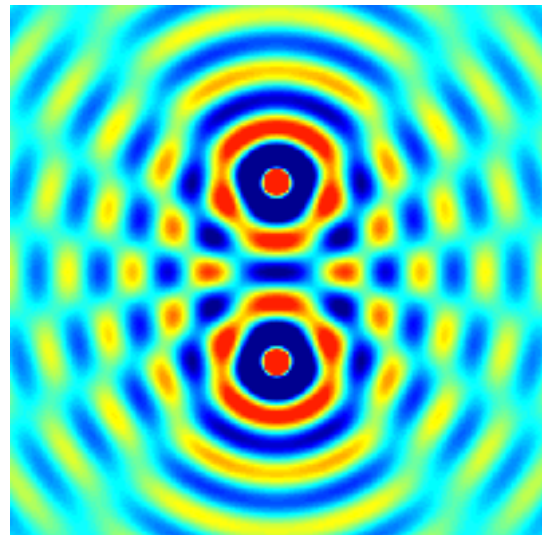
Több (>1), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés
($=d$ távolságra levő pontszerű rések, ahol $d \sim \lambda$)

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

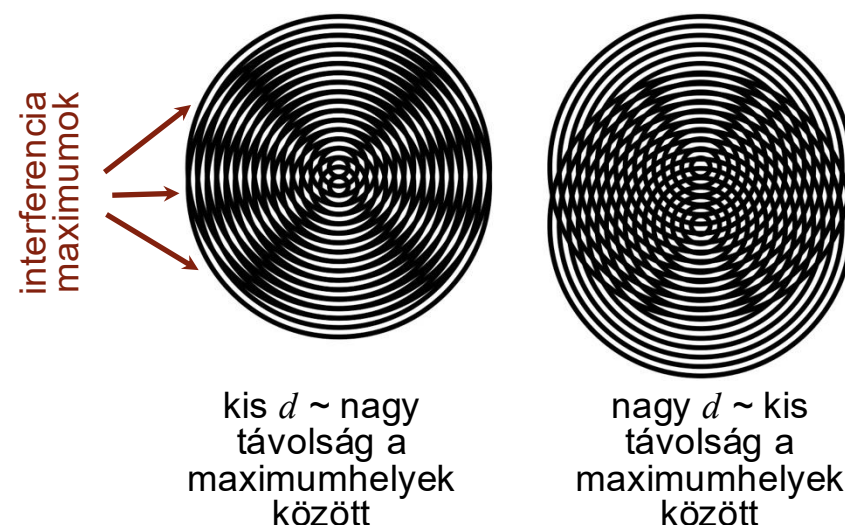
Ha $\Delta\varphi=\pi$
: kioltás



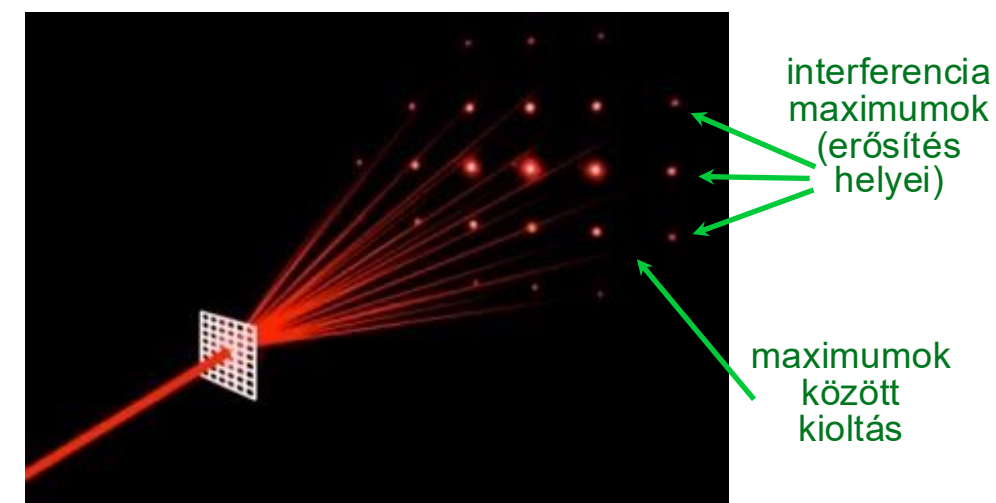
Két, pontszerű forrásból
származó hullámok
interferenciája



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



2D optikai rács elhajlási
(diffrakciós) interferencia képe

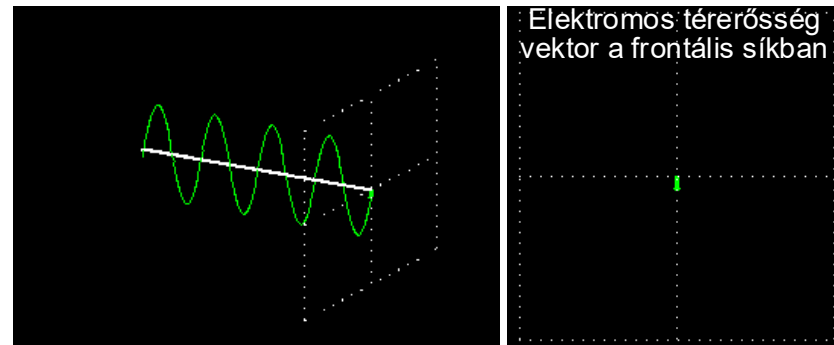
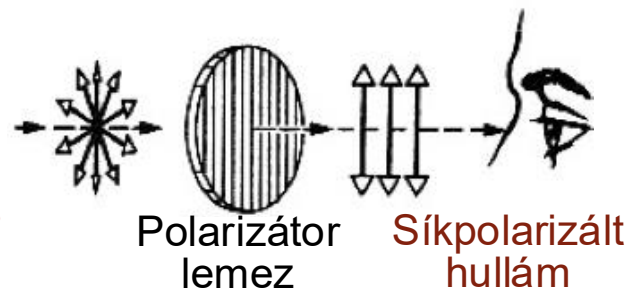


Hullámjelenségek III.

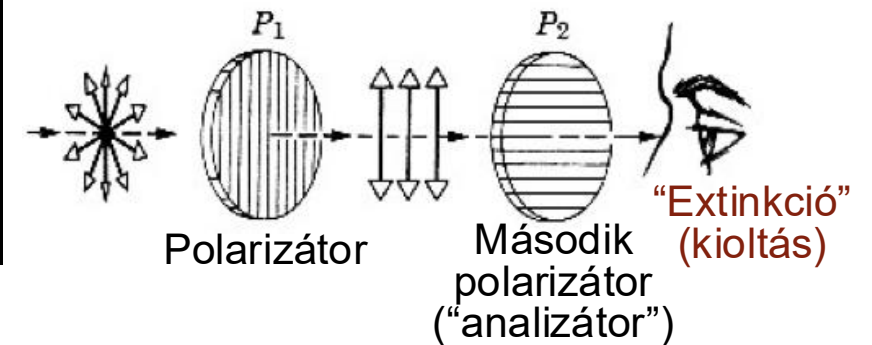
Polarizáció: kitüntetett irányú rezgés

Csak a **transzverzális** hullámok polarizálhatók.

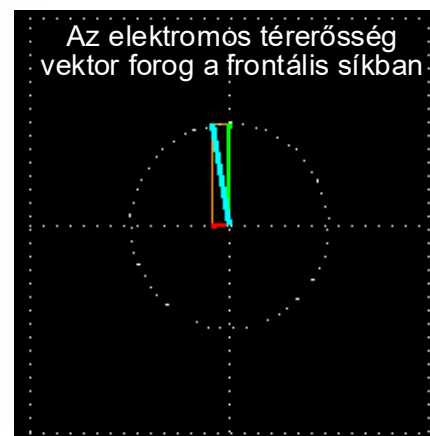
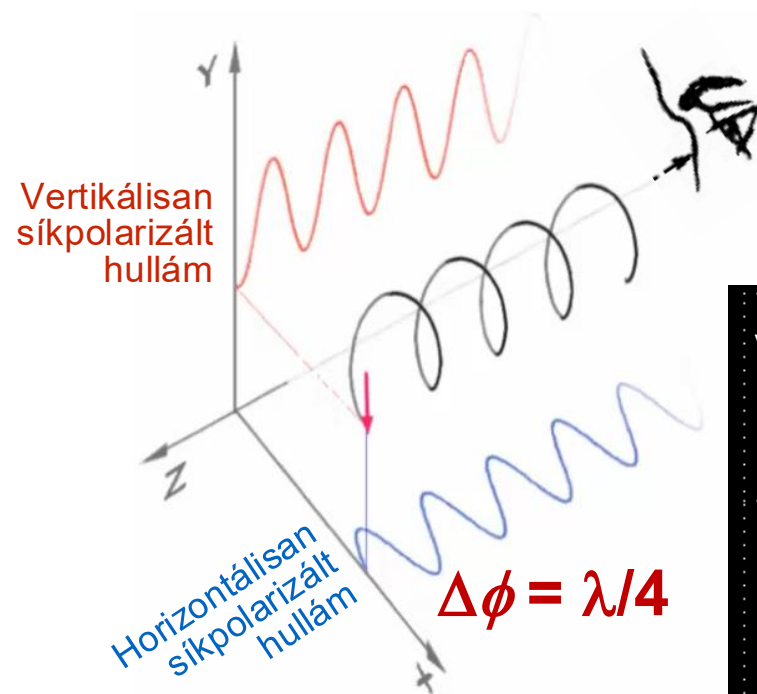
**Sík- vagy
lineáris
polarizáció**



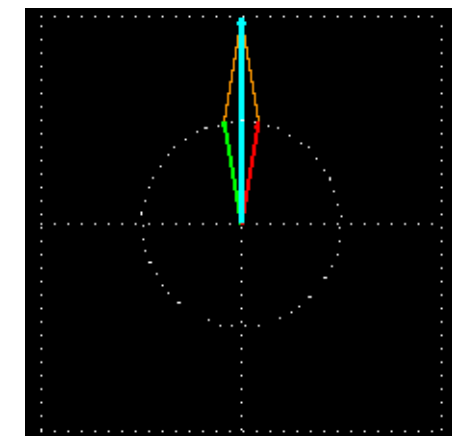
A síkpolárizált fény kioltható keresztállású polarizátorral



**Cirkuláris
polarizáció**

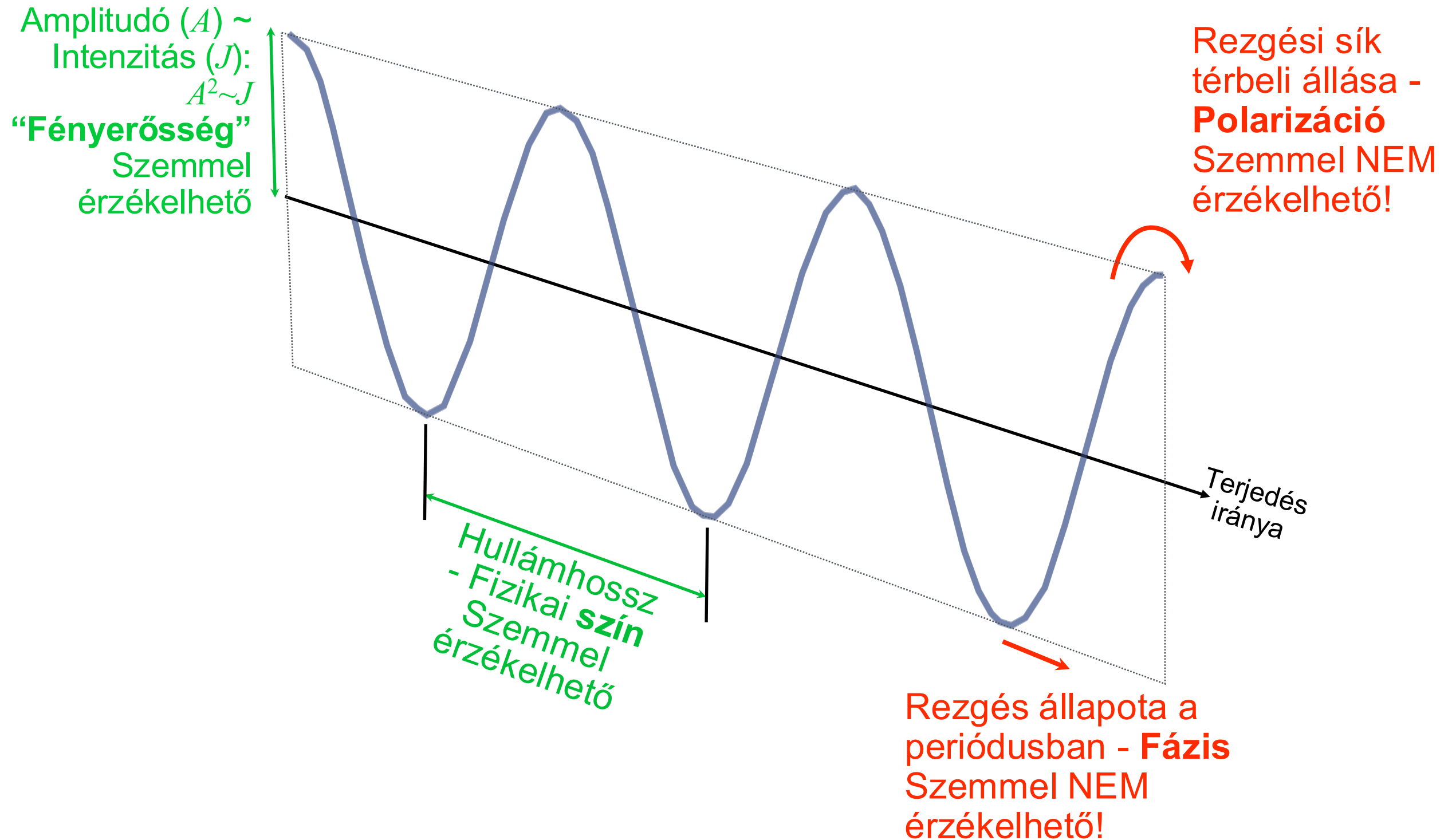


**N.B.: Síkpolárizált fény — jobbra és balra
cirkulárisan polarizált fény összege**



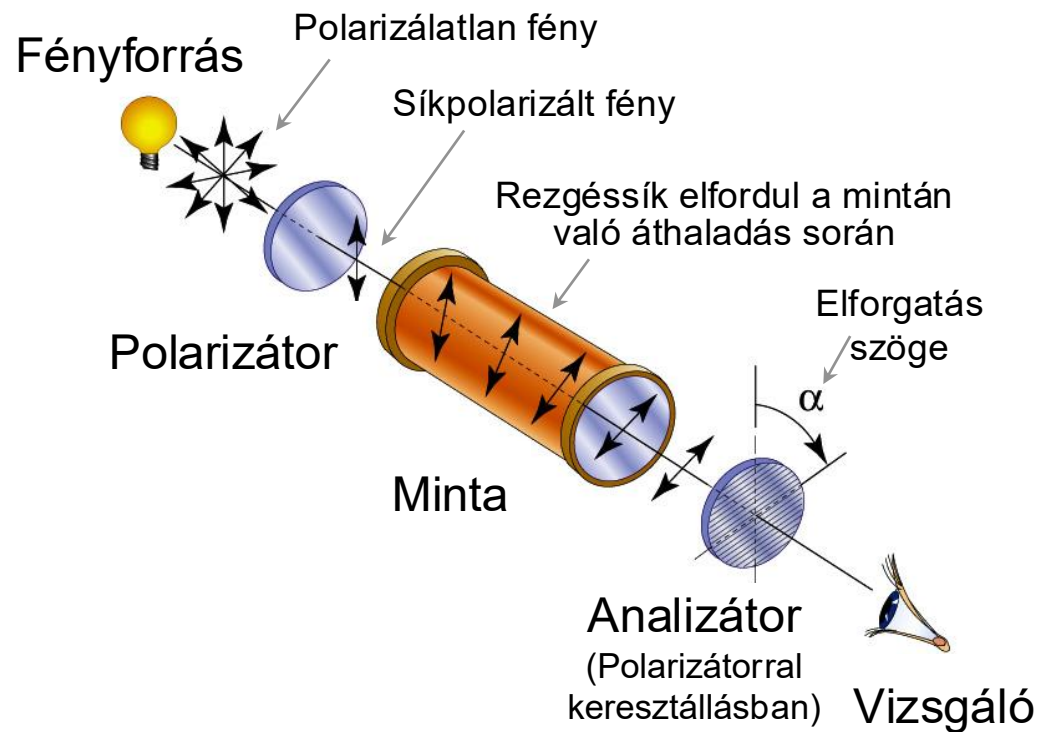
($\Delta\phi = 0$)

A fény mint hullám közvetlenül érzékelhető paramétereirei



Polarizáció alkalmazásai

Polarimetria



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

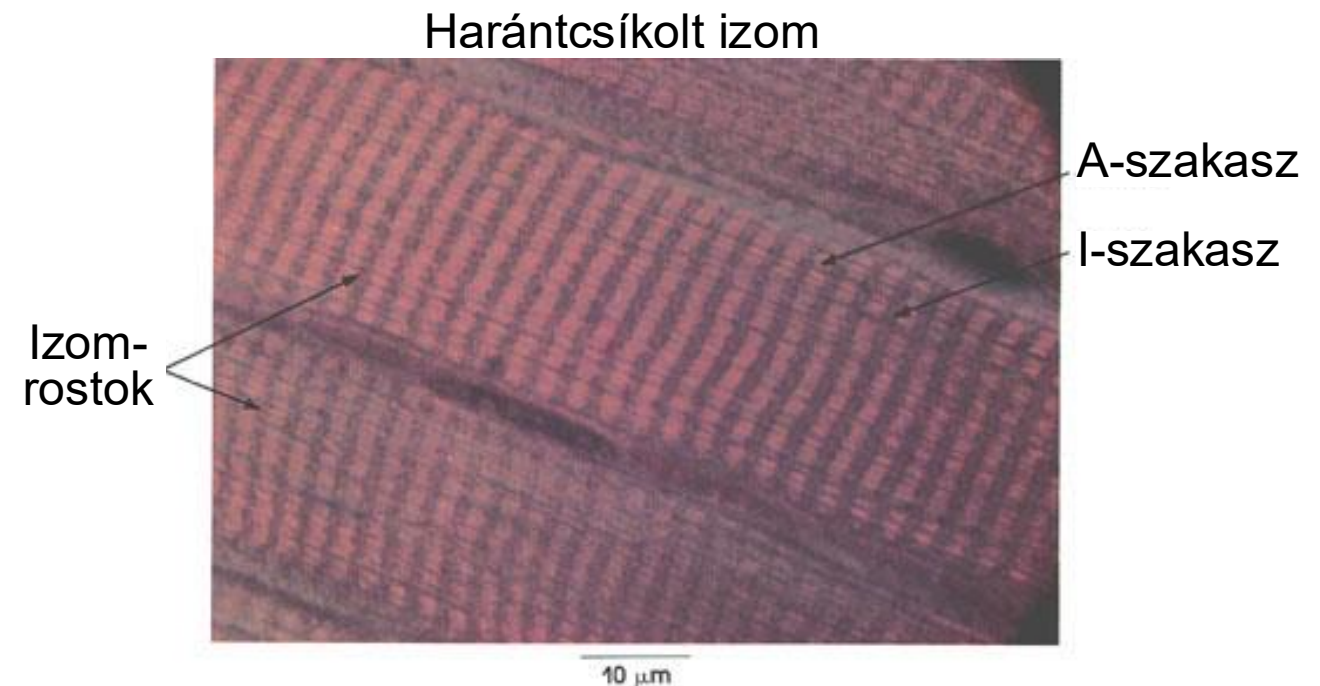
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

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

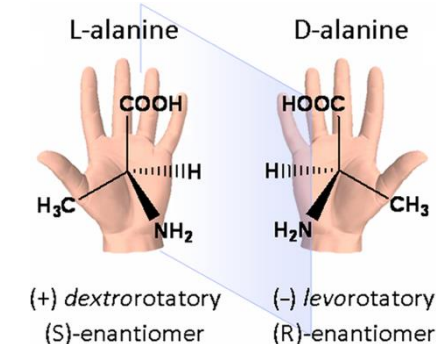
l = rétegvastagság (mintatartó hossza)

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

Polarizációs mikroszkópia



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



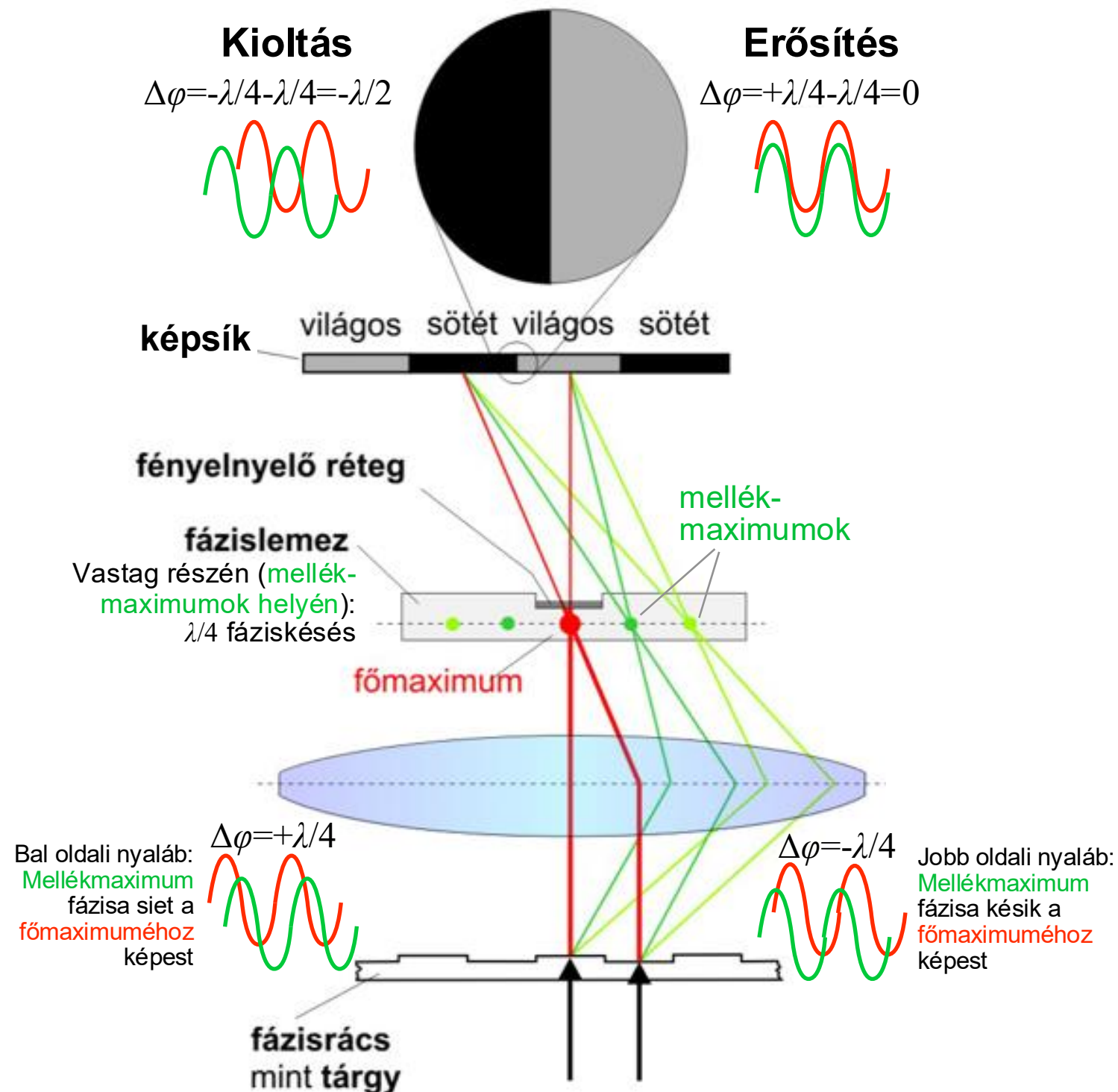
Fáziskontraszt mikroszkópia

A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitudó kontraszttá alakítja

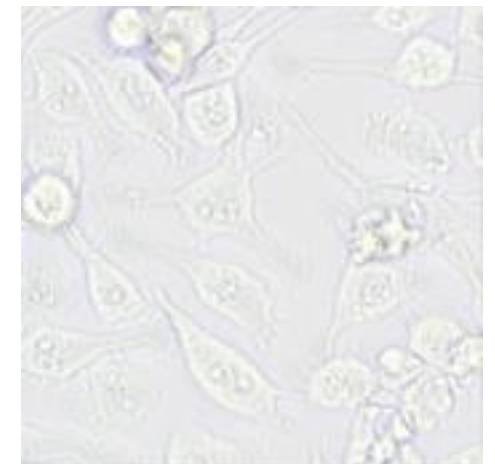


Frits Zernike (1888-1966)
Nobel-díj

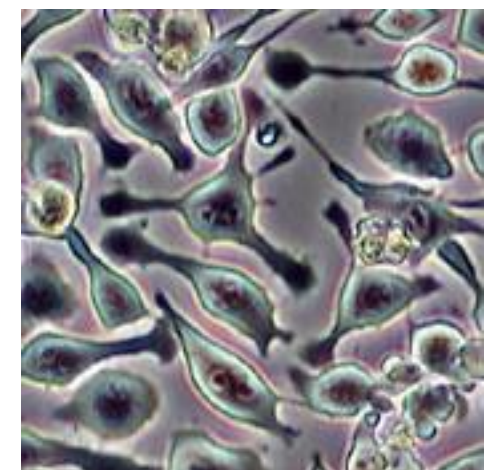
- Fázis: azt mutatja meg, hogy a teljes hullámmozgási periódus (2π) mely részén tart a rezgés.
- Fázisszöggel (φ) fejezzük ki.
- Hullámok egymáshoz viszonyított fáziskülönbsége ($\Delta\varphi$): fáziseltolódás (késés v. sietés)



**Élő (festetlen) sejtek
mikroszkópos képe**



Világos látóterű
mikroszkóp

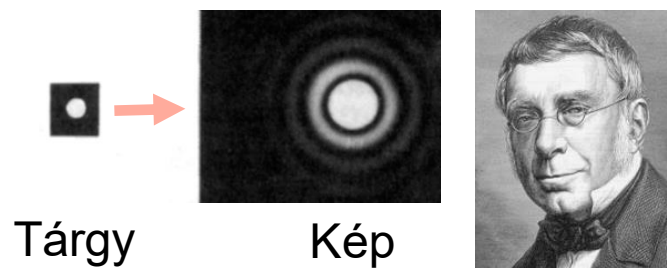


Fáziskontraszt
mikroszkóp

A szem feloldóképessége I.

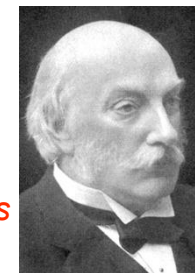
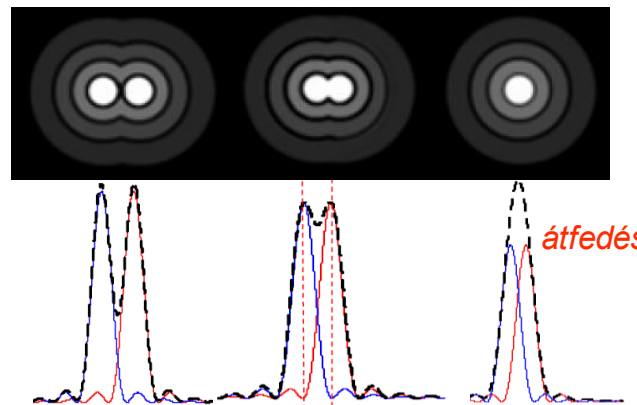
Hullámoptikai korlát

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):

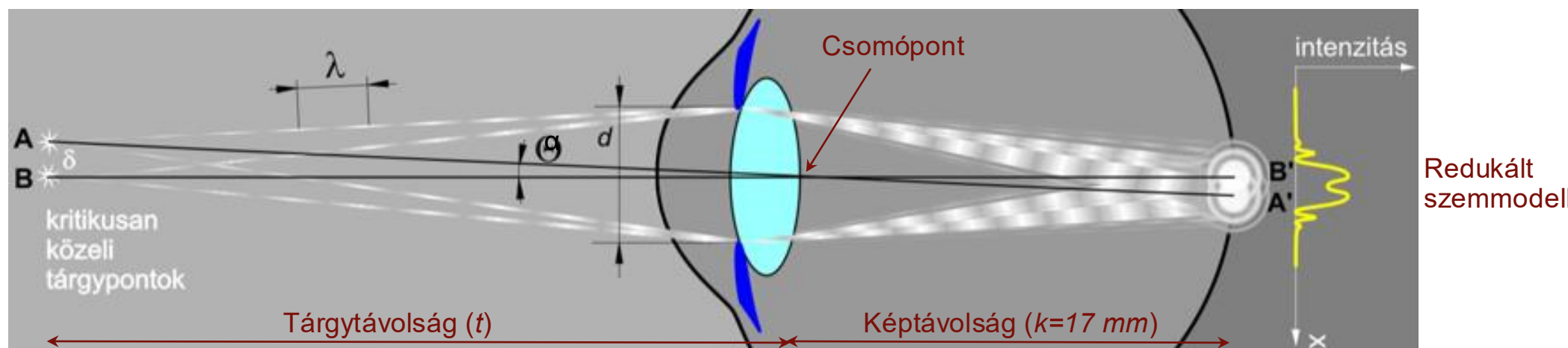
$$\delta = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

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)

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**.

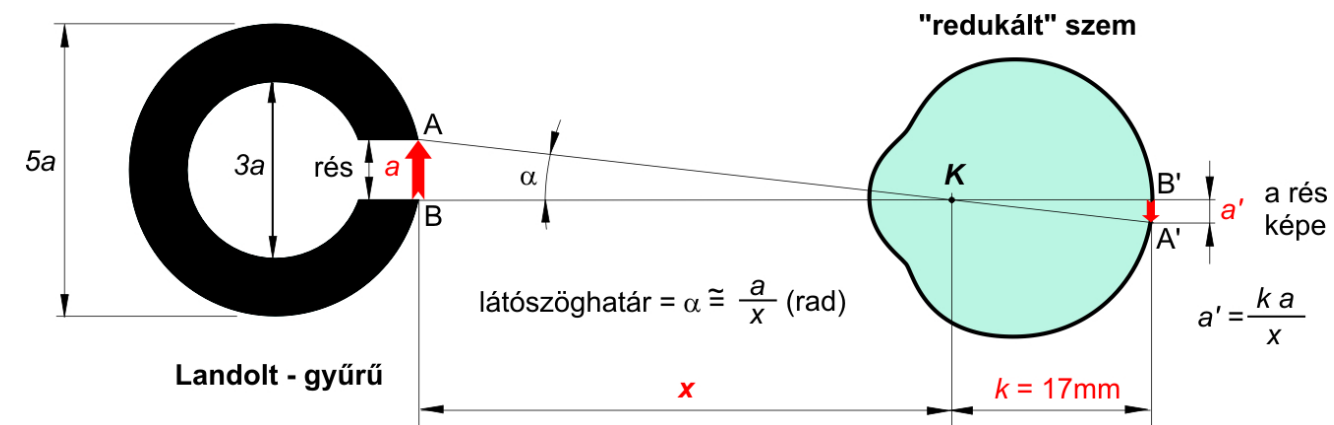
Látásélesség (*visus*, “Visual Acuity”, VA):

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

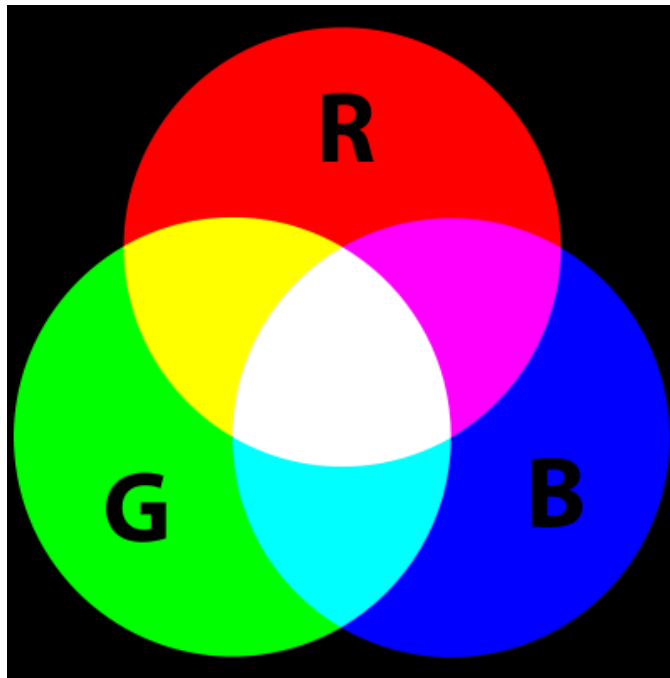
α = kísérleti (mért) látószöghatár

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

Látásélesség mérése



Színkódolás, színlátás



Additív színkódolás

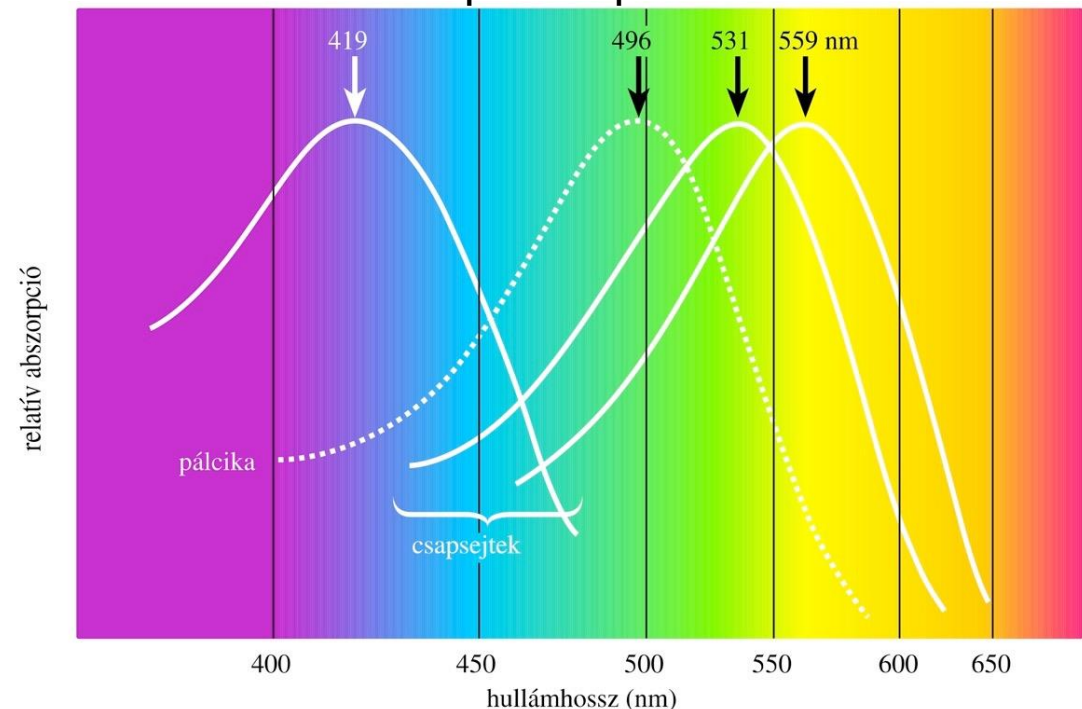
Bármely szín kikeverhető a három alapszín (R =vörös, G =zöld, B =kék) megfelelő súlyozású összekeverésével

$$X = rR + gG + bB$$

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/index.php?feedback-qr=JUH0WG25US42ERUQ>