

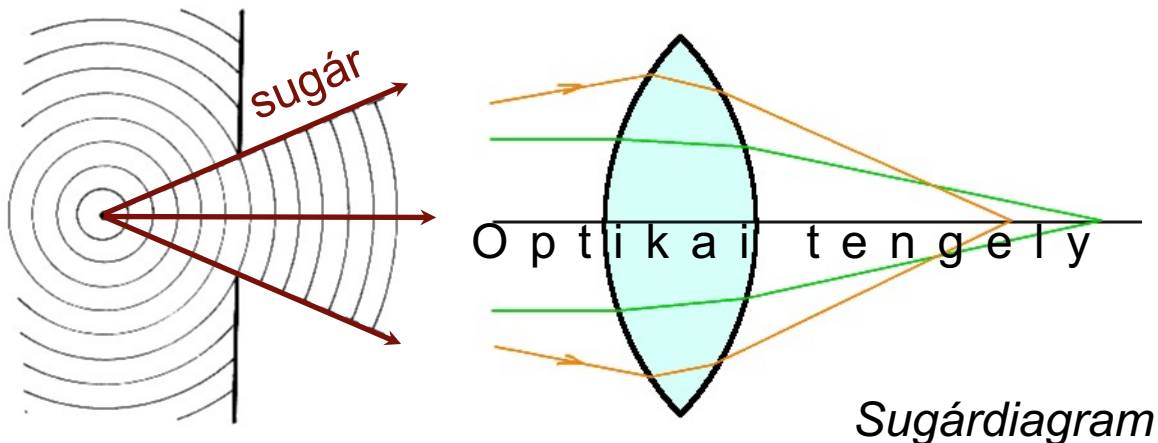
HULLÁMOPTIKA

KELLERMAYER MIKLÓS

Geometriai és hullámoptika

Geometriai optika

Ha a fény a hullámhossznál sokkal nagyobb résen halad át, a hullámfront (fázis) terjedése egy egyenessé ("sugár") egyszerűsíthető.



- Optikai nyaláb ("fény sugar"): absztrakció, matematikai egyenes.
- A nyilak az energiaterjedés irányát jelölik.
- Optikai tengely: az optikai elemek (pl. lencsék) középpontján áthaladó egyenes.
- Reverzibilitás elve: az energiaterjedés (nyilak) iránya megfordítható.

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

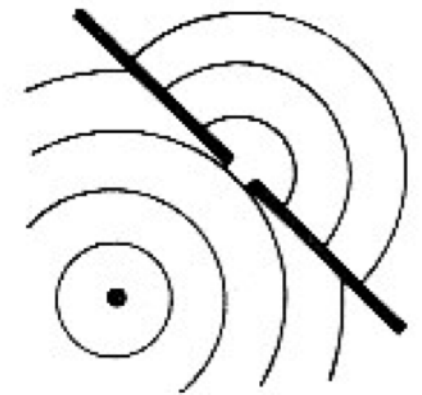
Optikailag sűrűbb közegben a fény terjedési sebessége csökken (c_1).

Ez kifejezhető az abszolút törésmutatóval (n_1):

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:

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

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

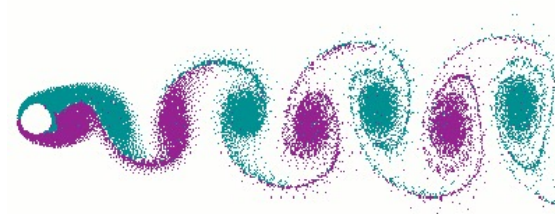
A hullámok forrása: rezgőmozgás

Példa:
Mechanikai
rezgés

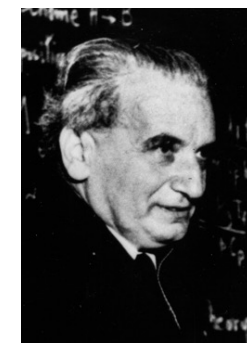


- Tacoma Narrows Bridge** ("Gallopín' Gertie")
- ("Gertie the Dinosaur" (1914), rajzfilm, Winsor McCay)
 - Átadás: 1940. július 1.
 - Szélben (50-70 km/h): órákon át tartó rezgés.
 - Rezgés amplitudó eleinte 0,5 m, majd egy tartókábel elszakadása után akár 9 m!
 - Összeomlás: 1940. november 7.

Magyarázat:
Kármán örvények
„rángatják” a
tárgyak



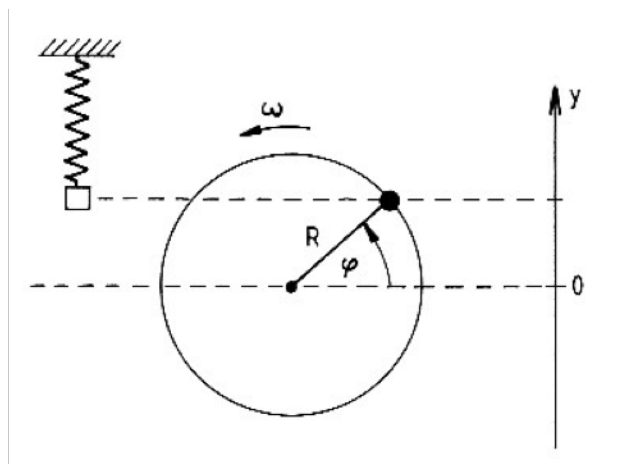
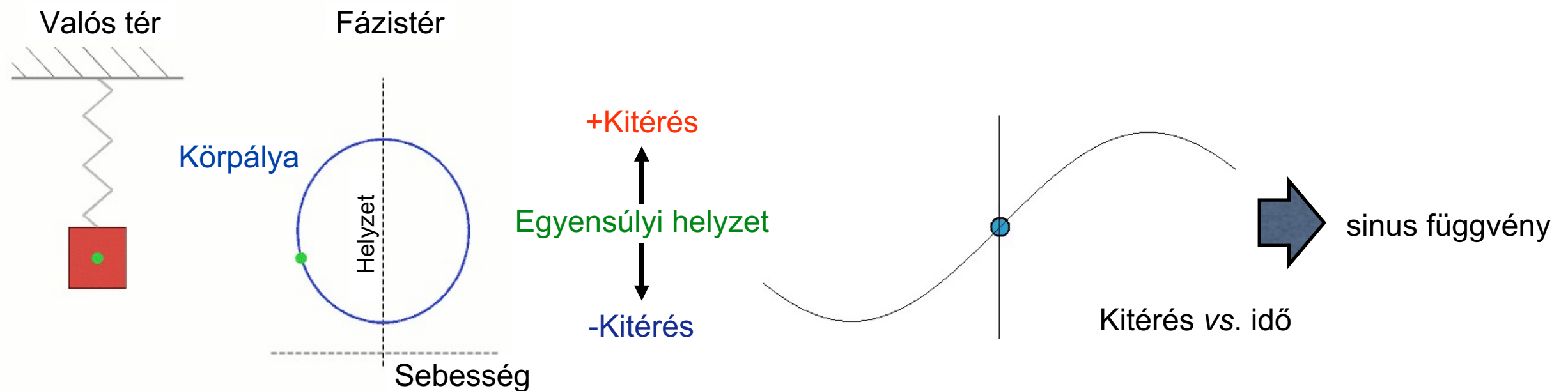
Kármán-féle örvények
(Szélben, a híd élén keletkeznek. Ha
nem válnak le a felületről, rezgés lép fel.)



Kármán Tódor
(Theodore von Kármán)
1881-1963

Harmonikus rezgőmozgás

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



$$y = R \sin \varphi$$

Mivel $\phi = \omega t$: $y = R \sin(\omega t)$

Ha a kiindulási fáziszög (ϕ_0) nem zérus: $y = R \sin(\omega t + \varphi_0)$

Mivel a szögsebesség (ω) a periódusidő (T) alatt megtett teljes kör (2π): $y = R \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_0\right)$

A tovaterjedő hullámmozgás fontos paraméterei:

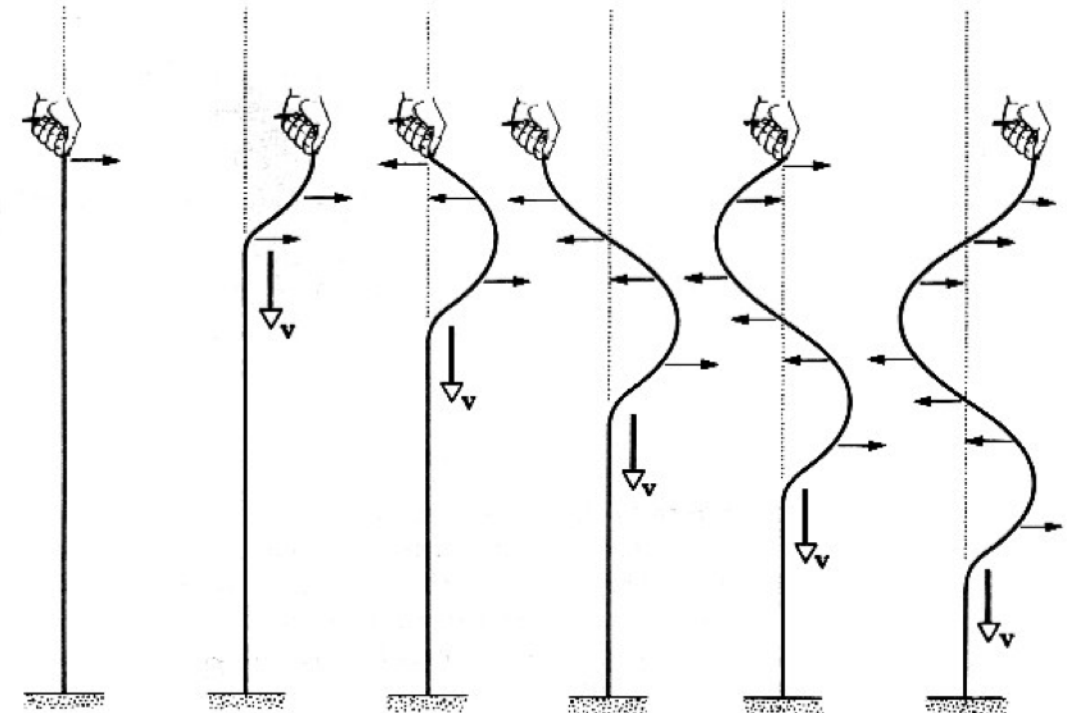
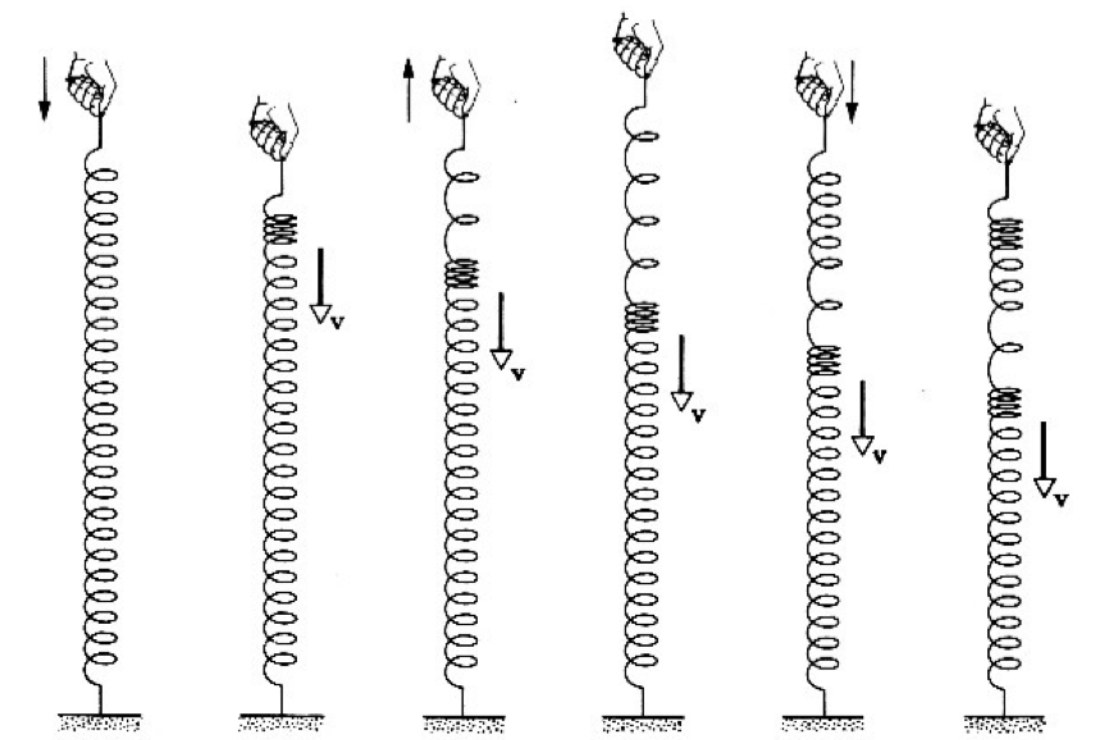
- Periódusidő (T)
- Frekvencia ($f=1/T$)
- Terjedési sebesség (v, c)
- Hullámhossz (λ): egy periódusidő alatt megtett távolság:

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

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

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

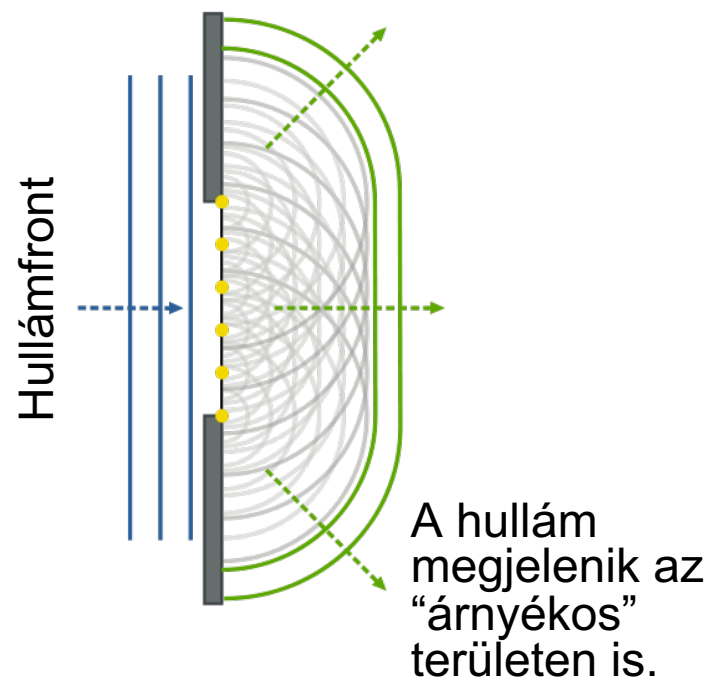
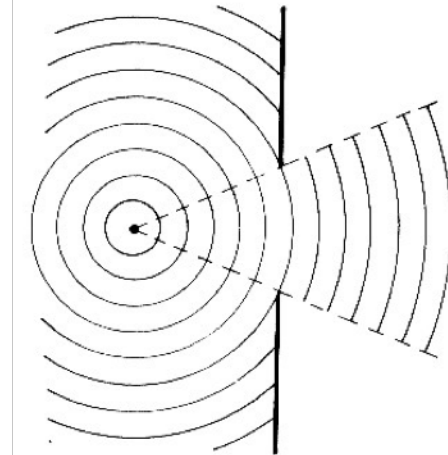


Christiaan Huygens
(1629-1695)

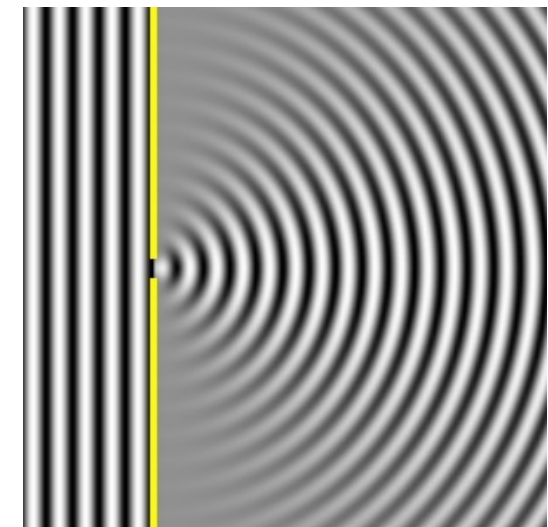
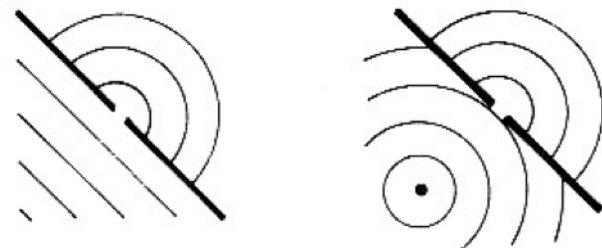


Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)

Hullámhossznál
sokkal nagyobb rés



Hullámhossznál
kisebb rés



Hullámjelenségek II.

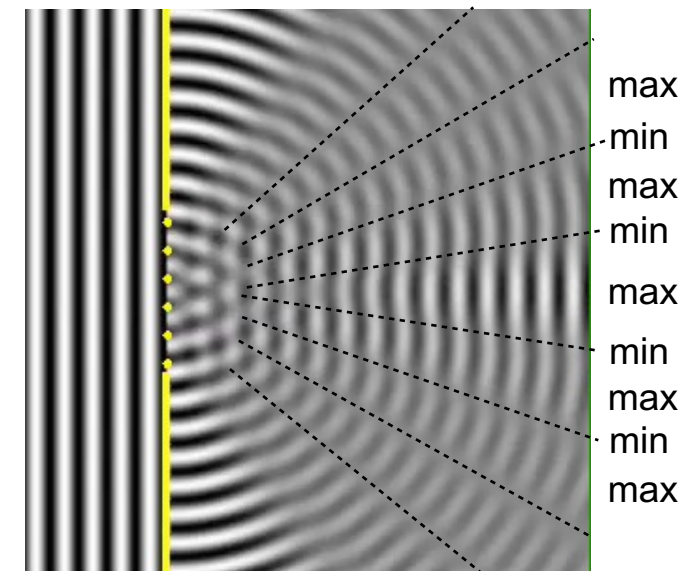
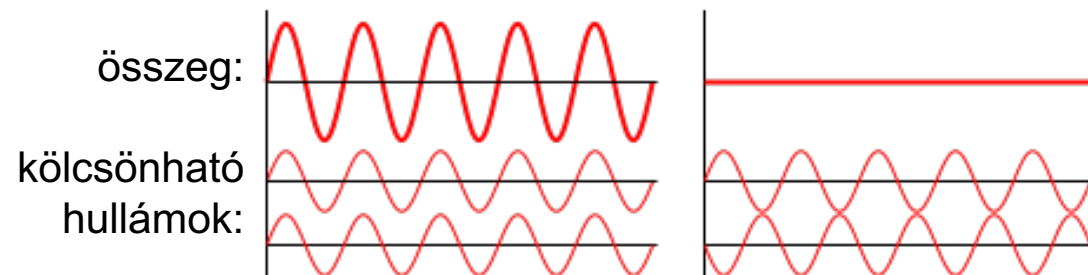
Interferencia

Alapja: szuperpozíció elve

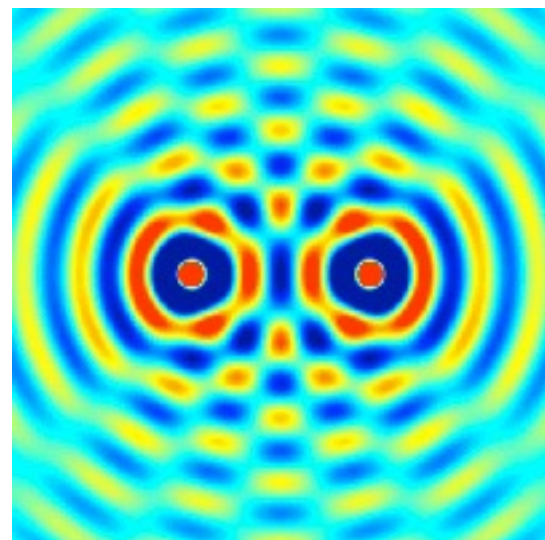
Több (>1), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés
($=d$ távolságra levő pontszerű rések, ahol $d \sim \lambda$)

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

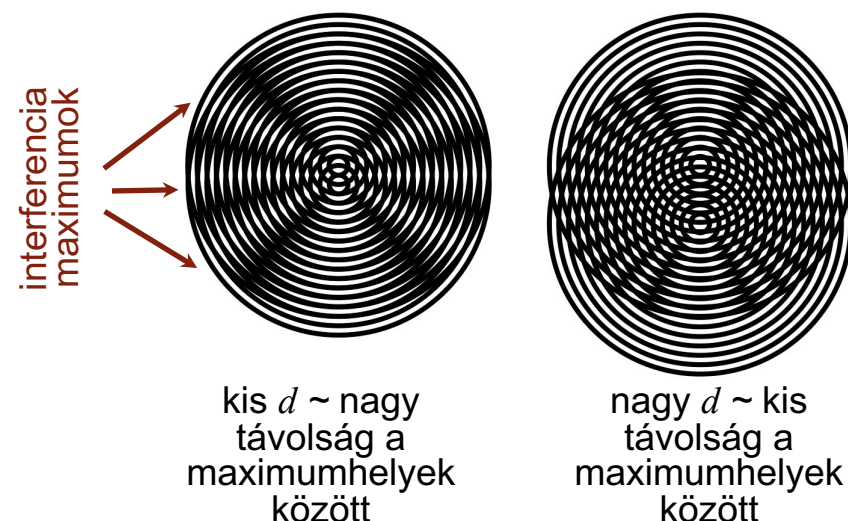
Ha $\Delta\varphi=\pi$
: kioltás



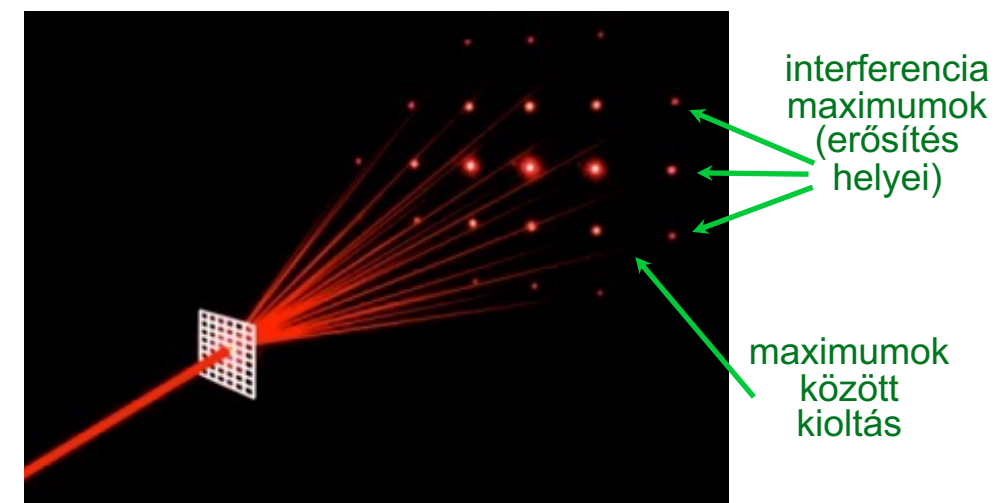
Két, pontszerű forrásból
származó hullámok
interferenciája



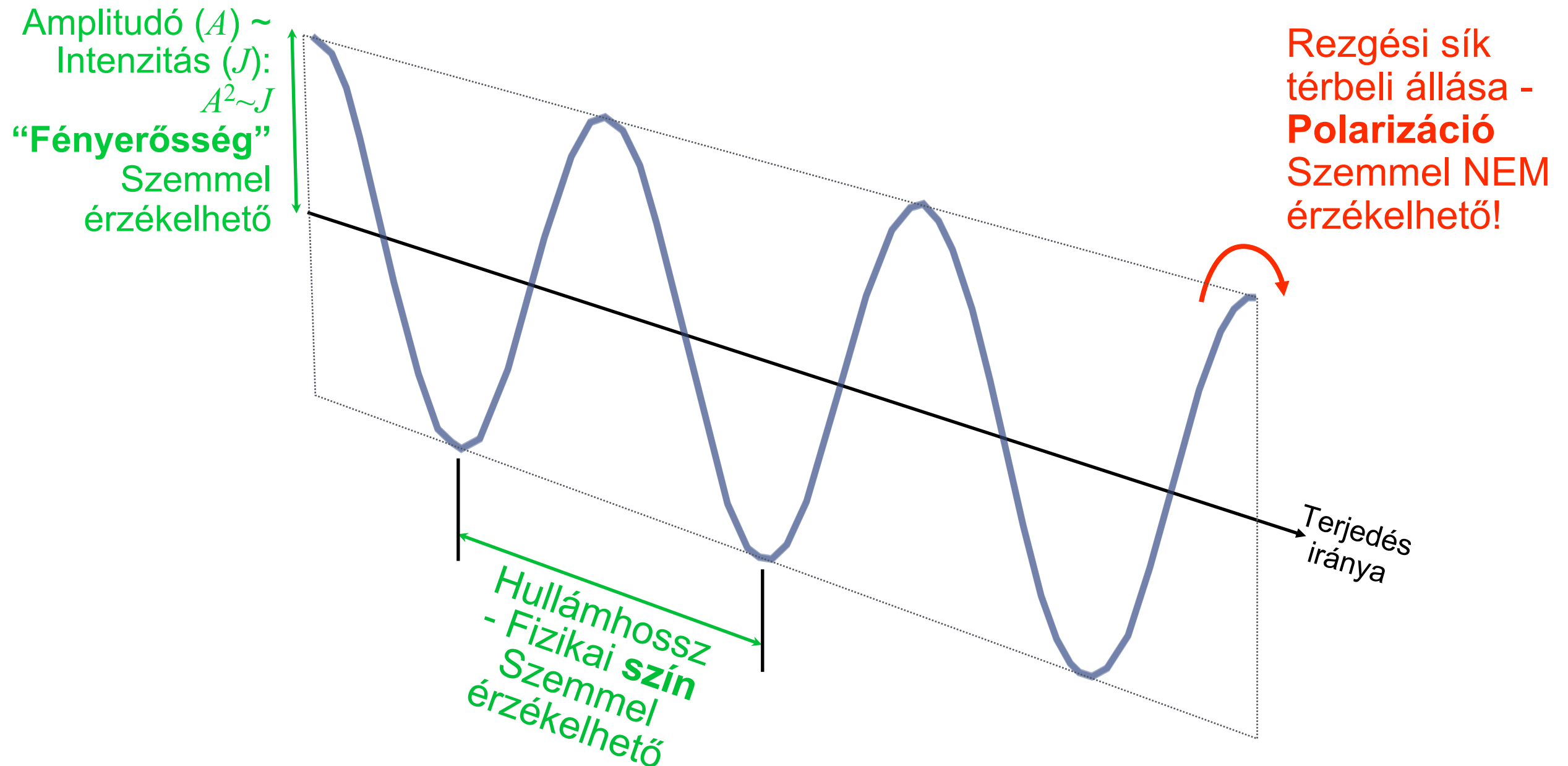
Kialakuló **interferencia
mintázat** a pontszerű rések
közötti távolságtól (d) függ



2D optikai rács elhajlási
(diffrakciós) interferencia képe



A fény mint hullám közvetlenül érzékelhető paraméterei



Hullámjelenségek III.

Polarizáció

Polarizáció: kitüntetett irányú rezgés

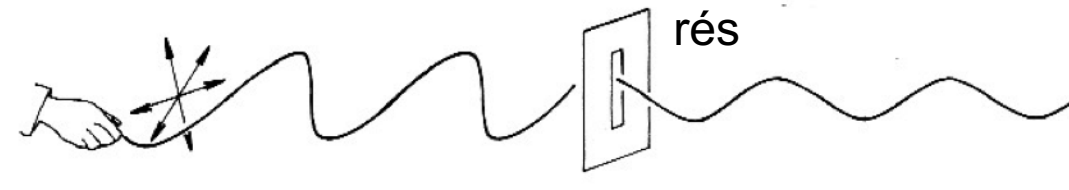
Kettős törés: anizotróp terjedési sebesség

Csak a **tranzverzális** hullámok polarizálhatók.



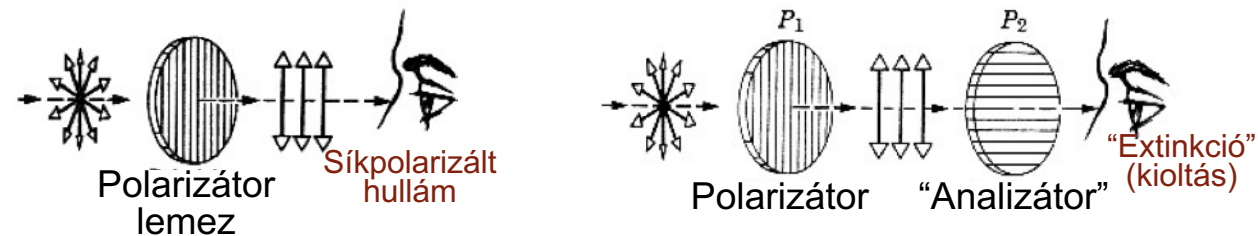
Mechanikai

hullámok
polarizálása

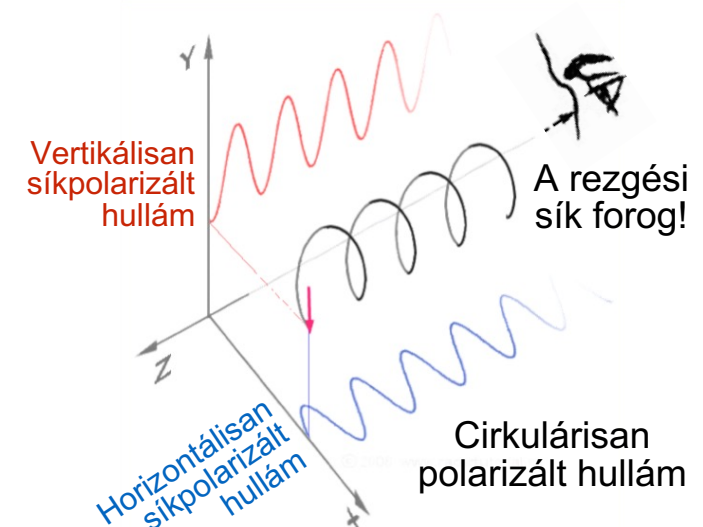
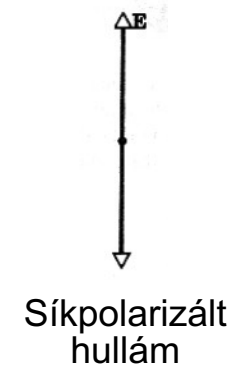
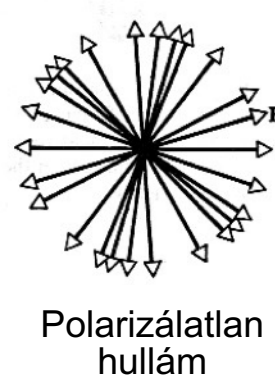


Elektromágneses

hullámok polarizálása



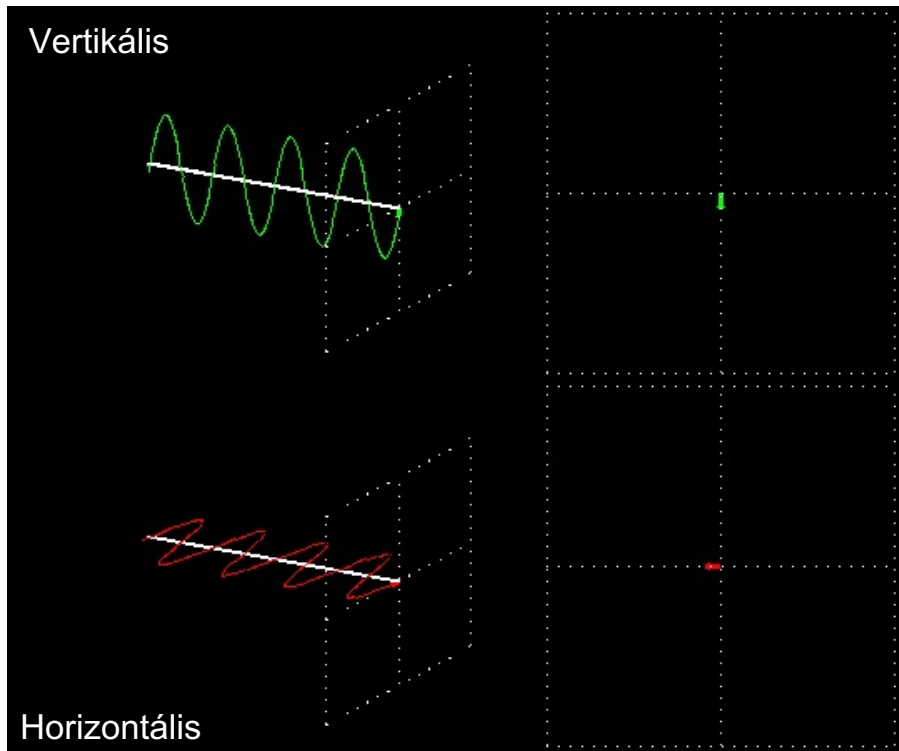
Polarizáció illusztrálása a terjedési irányból nézve:



Polarizált fény és kölcsönhatásai

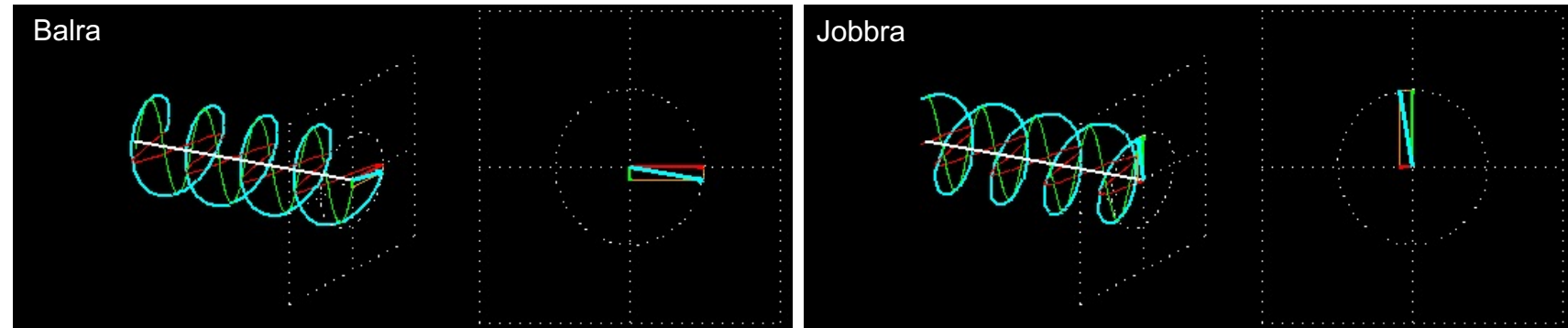
Rezgés (elektromos v. mágneses tér) kitüntetett irányú - rezgési sík kitüntetett állású

1. Síkpolarizált fény

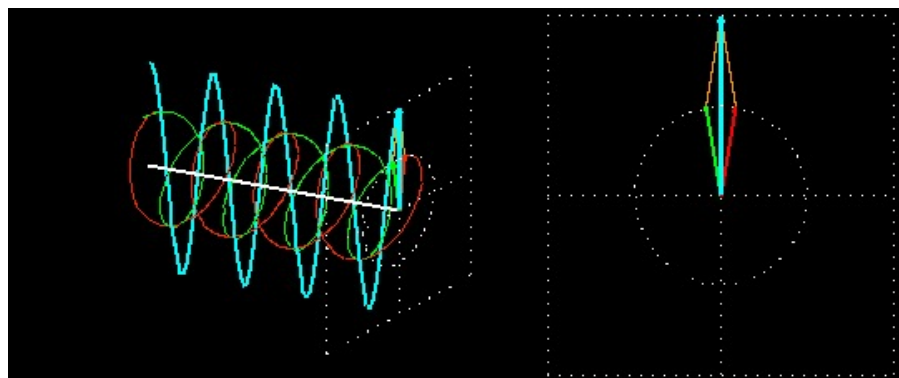


2. Cirkulárisan polarizált fény:

Vertikálisan és horizontálisan síkpolarizált, azonos hullámhosszú, $\lambda/4$ fáziskülönbségű hullámok szuperpozíciója

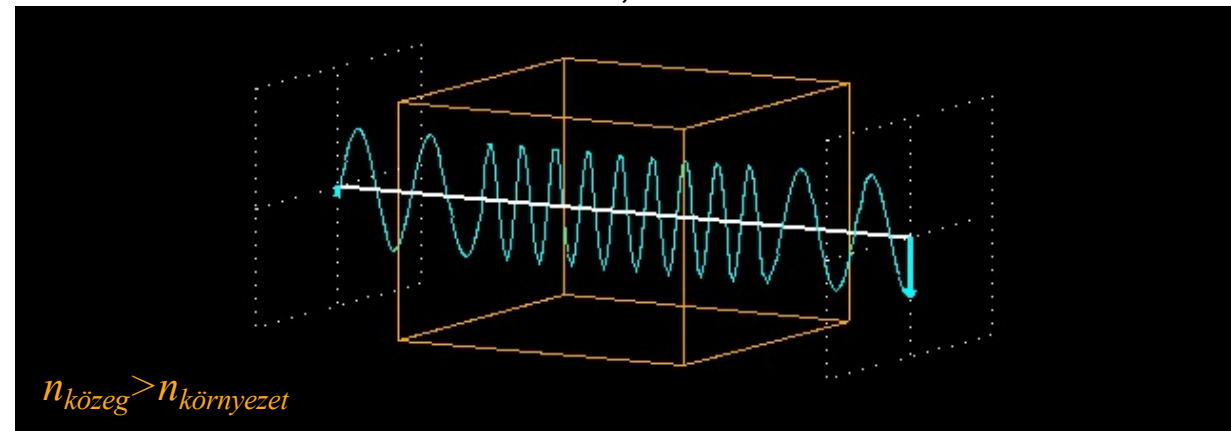


3. Jobbra és balra cirkulárisan polarizált fény szuperpozíciója síkpolarizált fény eredményez:

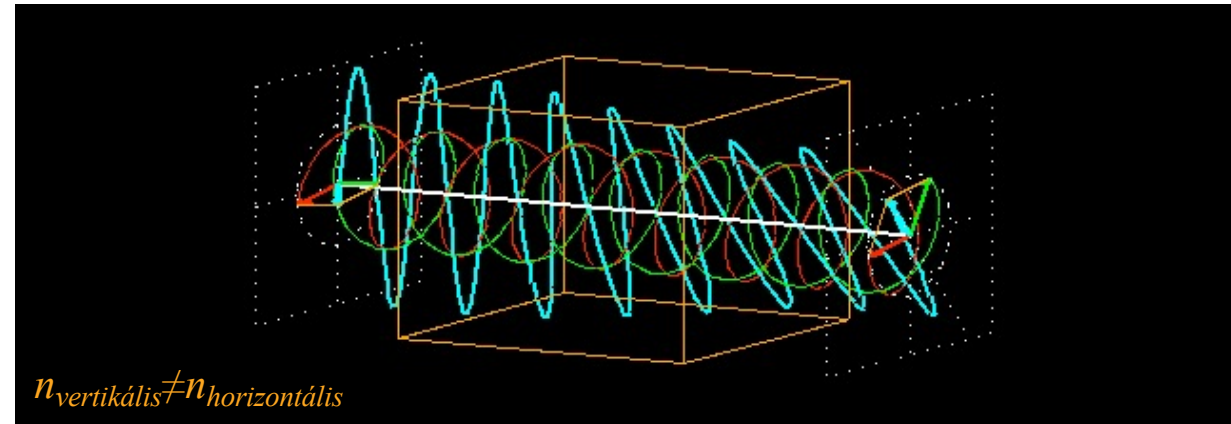


A rezgési sík orientációja a cirkulárisan polarizált hullámok relatív fázisaitól függ

4. Optikailag sűrű közegben a fény lelassul; mivel a frekvencia konstans, a hullámhossz csökken



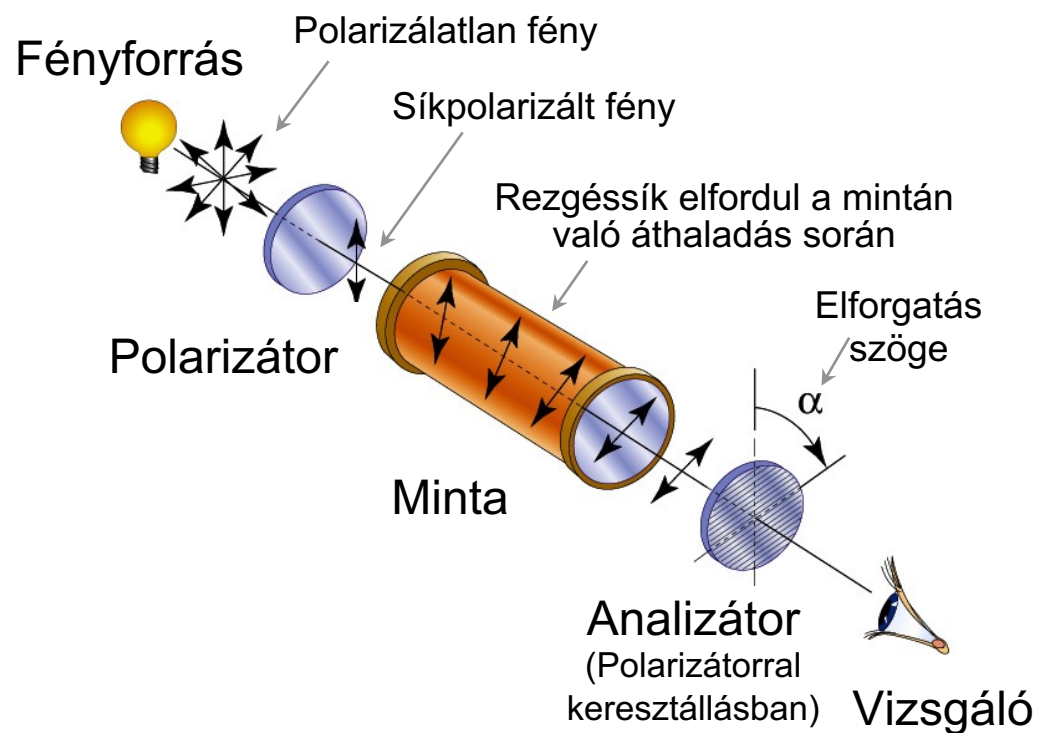
5. Anizotróp* közegben a cirkulárisan polarizált komponensek között fáziseltolódás lép fel: a kilépő fény rezgésíkja "elfordul"



*Anizotrópia (kettőtörés): a törésmutató (~fény terjedési sebessége) irányfüggést mutat a mintában (különböző irányokban más értékeket vesz fel).

Polarizáció alkalmazásai

Polarimetria



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

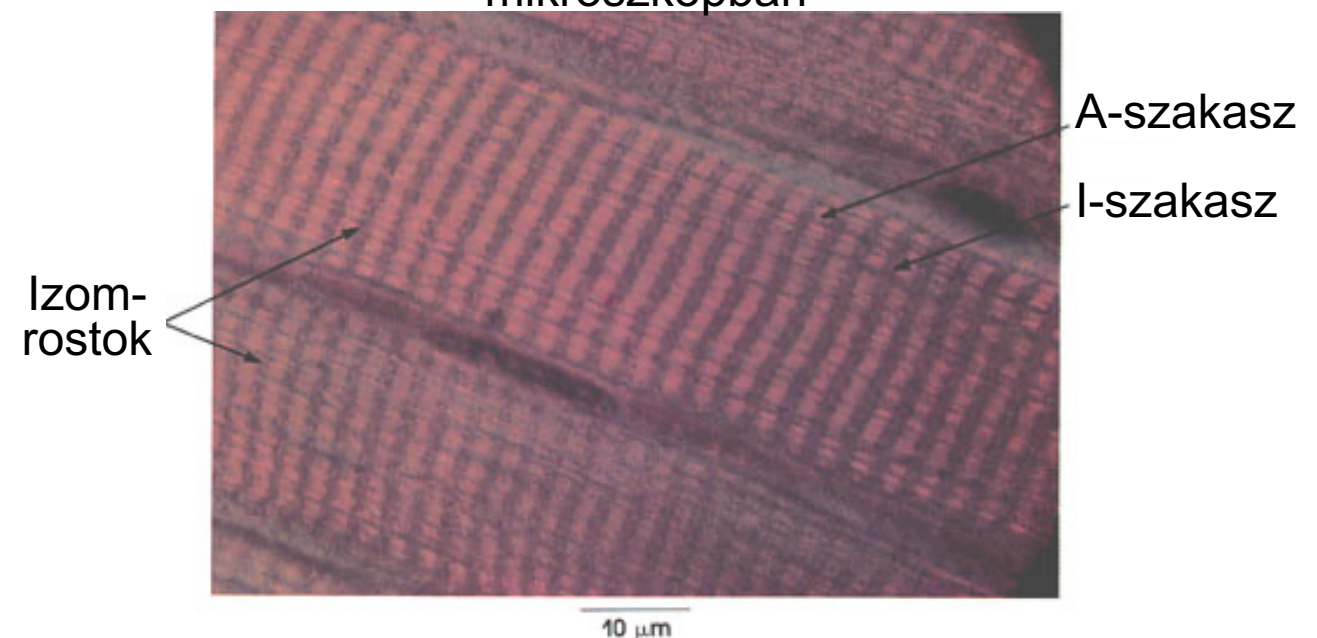
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

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

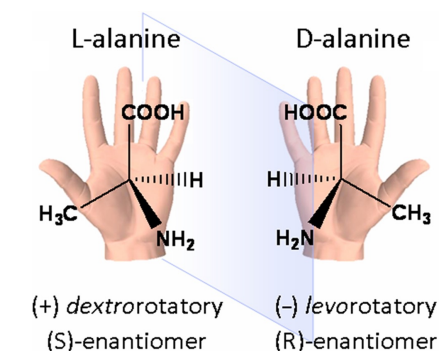
*Optikailag aktív anyag: **királis** molekulákat tartalmazó minta, amely a síkpolarizált fény rezgéssíkját elforgatja.

Polarizációs mikroszkópia

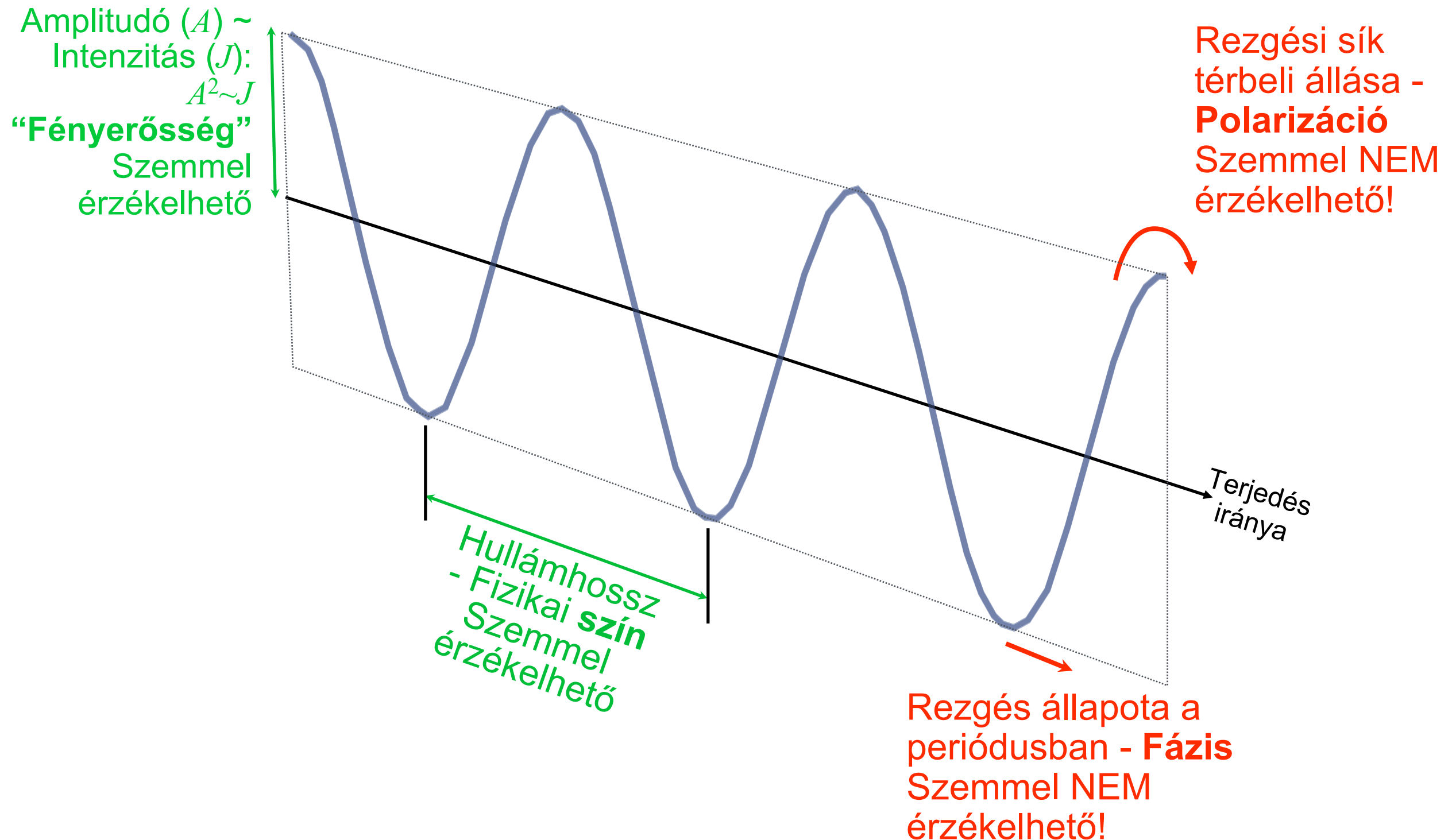
Harántcsíkolt izomrost polarizációs mikroszkópban



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



A fény mint hullám közvetlenül érzékelhető paramétereirei



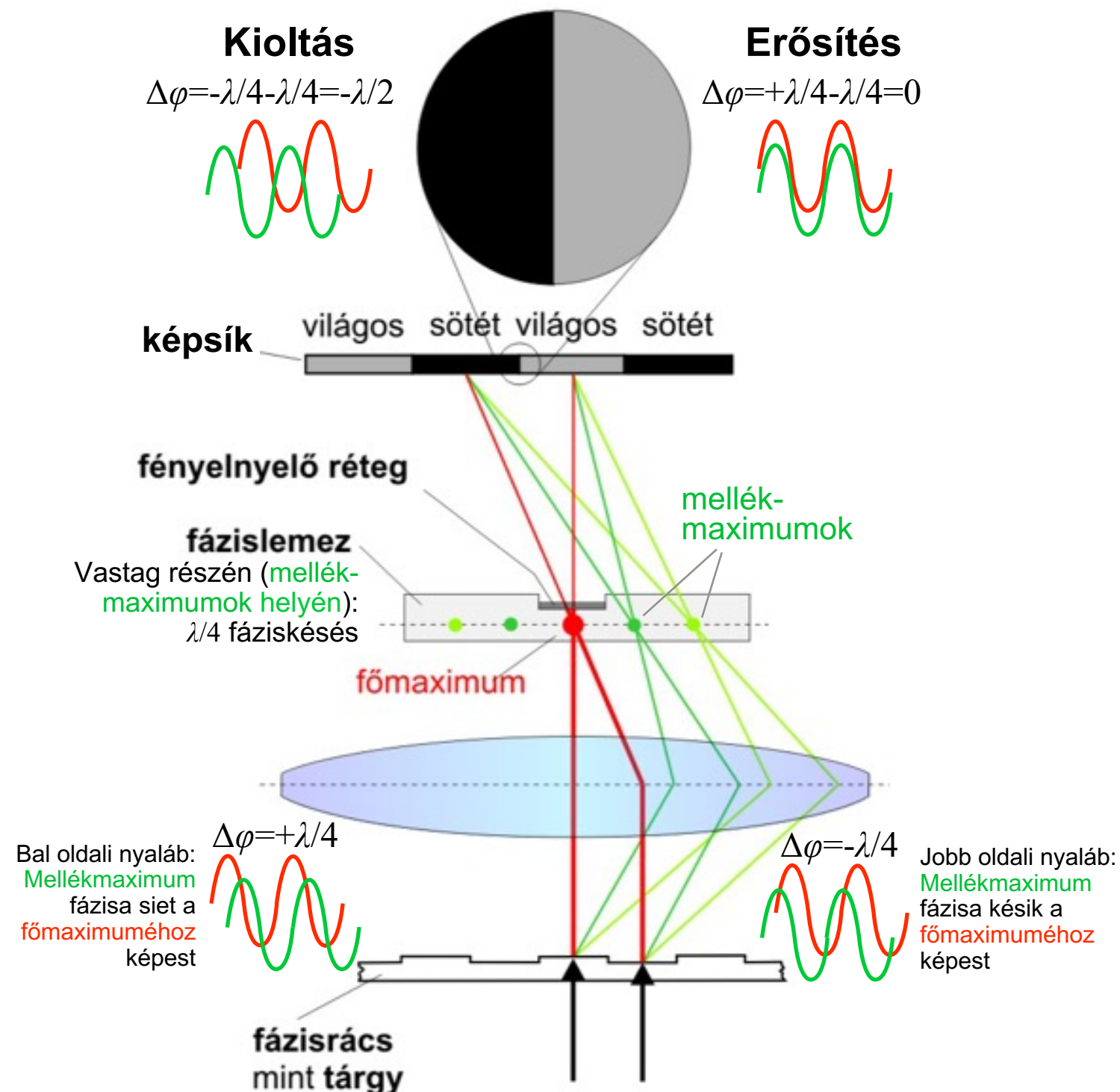
Fáziskontraszt mikroszkópia

A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitudó kontraszttá alakítja

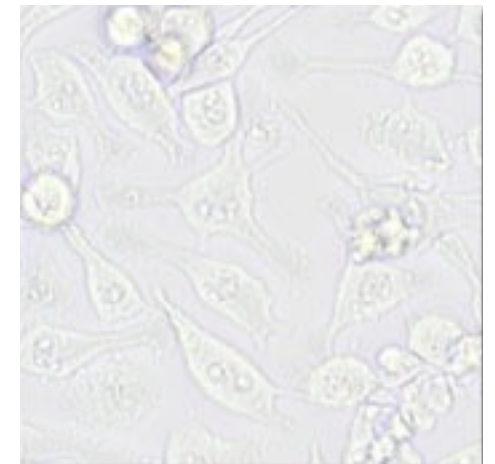


Frits Zernike (1888-1966)
Nobel-díj

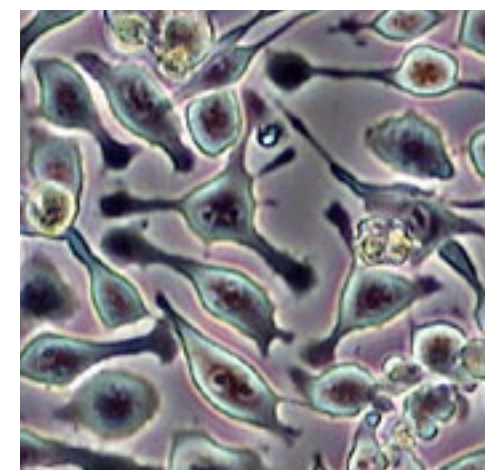
- Fázis: azt mutatja meg, hogy a teljes hullámmozgási periódus (2π) mely részén tart a rezgés.
- Fázisszöggel (φ) fejezzük ki.
- Hullámok egymáshoz viszonyított fáziskülönbsége ($\Delta\varphi$): fáziseltolódás (késés v. sietés)



Élő (festetlen) sejtek
mikroszkópos képe



Világos látóterű
mikroszkóp

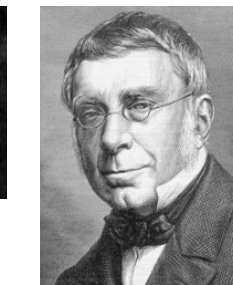
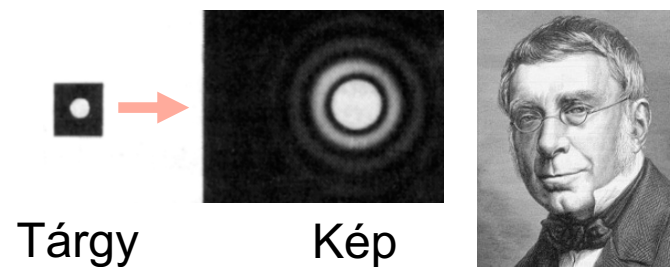


Fáziskontraszt
mikroszkóp

A szem feloldóképesége I.

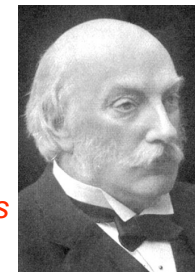
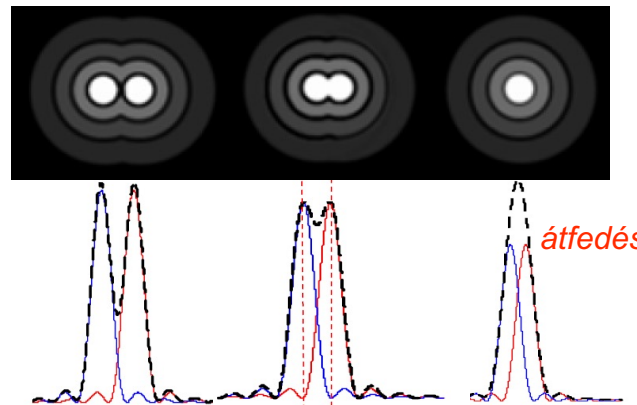
Hullámoptikai korlát

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):

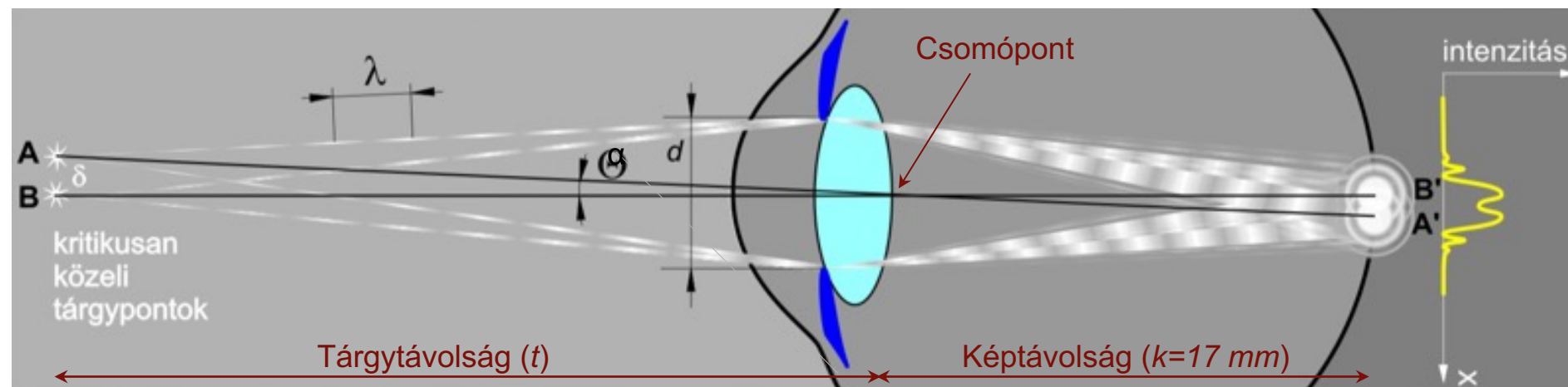
$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

λ = hullámhossz
 n = közeg törésmutatója
 α = 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 (α_B) $\approx 0.8'$.
- Az emberi szemben a hullámoptikai és biológiai feloldóképeség értékei nagyjából **egybeesnek**.

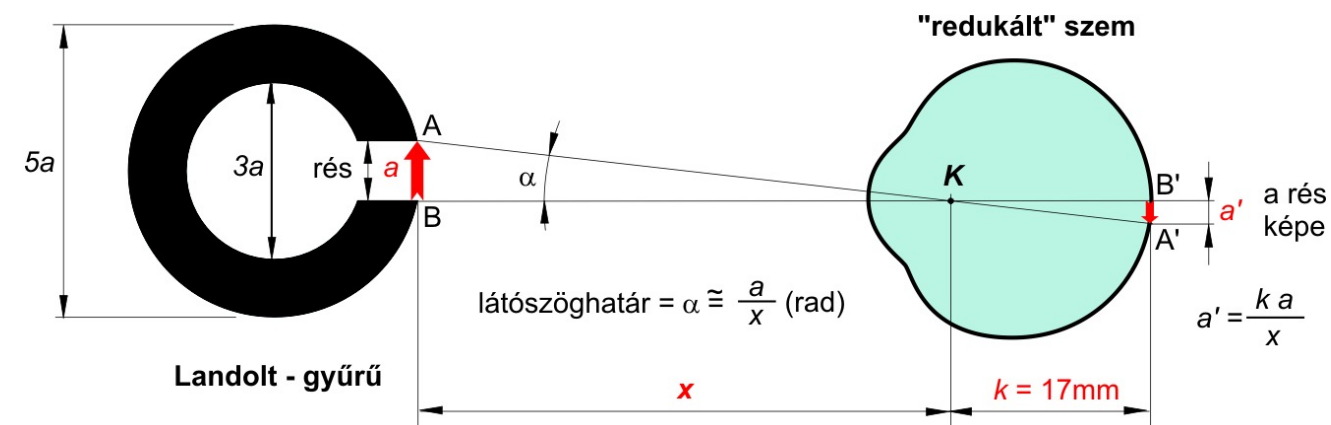
Látásélesség (*visus*, “Visual Acuity”, VA):

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

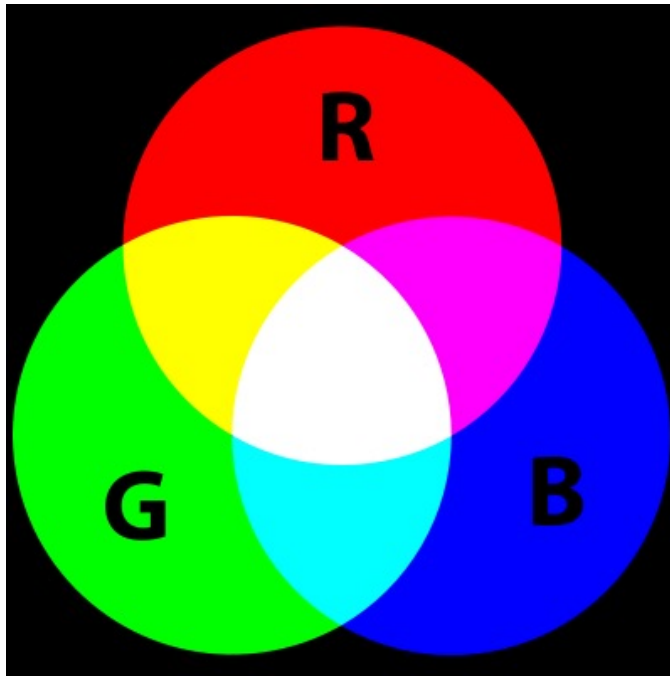
α = kísérleti (mért) látószöghatár

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

Látásélesség mérése



Színkódolás, színlátás



Additív színkódolás

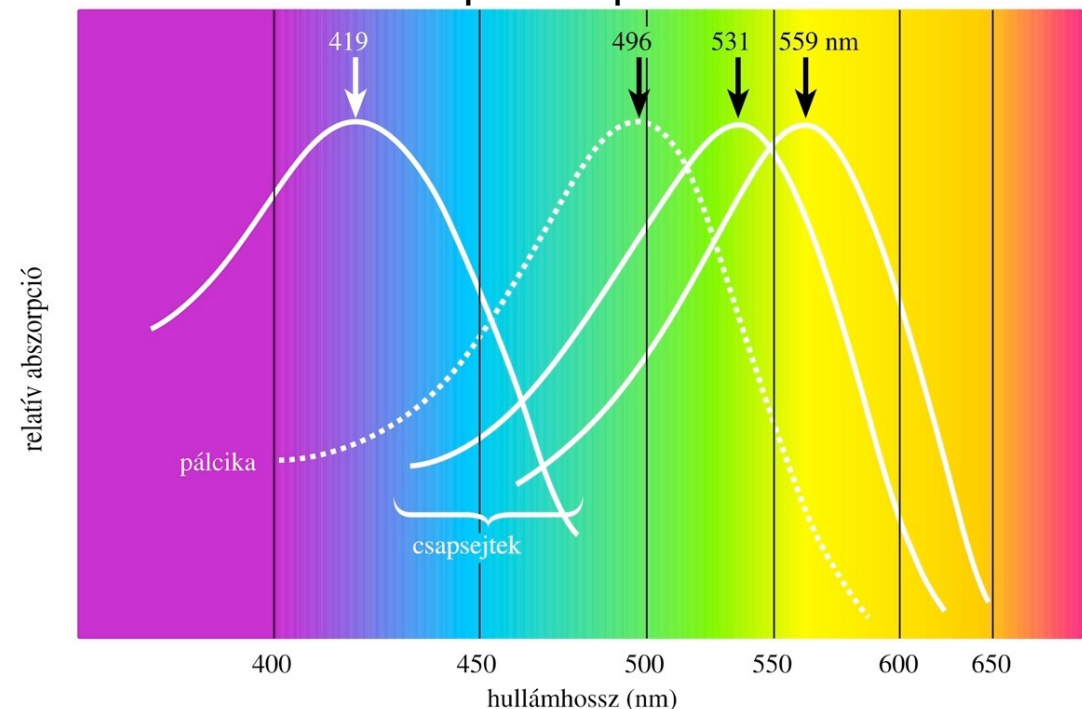
Bármely szín kikeverhető a három alapszín (R =vörös, G =zöld, B =kék) megfelelő súlyozású összekeverésével

$$X = rR + gG + bB$$

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/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=5AK3S0OEXVGZPYCV>